

ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y CRECIMIENTO DE *Pinus greggii* Engelm. SEIS AÑOS DESPUÉS DE UNA PODA QUÍMICA DE RAÍZ

NITROGEN UPTAKE AND GROWTH OF *Pinus greggii* Engelm. SIX YEARS AFTER CHEMICAL ROOT PRUNING

F. Clemencia Pacheco-Escalona, Armando Gómez-Guerrero, Arnulfo Aldrete,
Aurelio M. Fierros-González y Víctor M. Cetina-Alcalá

Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillos, Estado de México.
(agomezg@colpos.mx)

RESUMEN

La poda química de raíz es una práctica cultural aplicada en vivero para mejorar la fibrosidad del sistema radical, entre otros propósitos. En este estudio se cuantificó la absorción de nitrógeno (N) en *Pinus greggii* Engelm. seis años después de la aplicación de una poda química de raíz en vivero. Los tratamientos fueron: bolsa y tapete impregnados con cobre (T1); bolsa impregnada con cobre (T2); tapete impregnado con cobre (T3); bolsa sin impregnación de cobre (T4, testigo). La absorción de N se determinó en una muestra de 20 árboles, después de aplicar al suelo una fuente marcada con ^{15}N como $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y enriquecida al 49.2%. Se encontró que T2 causó mayor recuperación de N de la fuente marcada en follaje joven ($p \leq 0.01$). No hubo diferencias estadísticas entre tratamientos para el estado hídrico, crecimiento arbóreo y producción de materia seca aérea. Los análisis del follaje joven indicaron que la poda química de raíz tuvo efectos positivos en la absorción de N seis años después de plantar en campo, por lo que se infiere que dicha práctica es benéfica durante los primeros años de establecimiento de las plantaciones forestales.

Palabras clave: *Pinus greggii*, raíces finas, ^{15}N .

INTRODUCCIÓN

La raíz realiza funciones de absorción y transporte vitales para el desarrollo y crecimiento de las plantas, además de servir para anclar y soportar la parte aérea (Pritchett, 1986). La distribución del sistema radical determina la capacidad de exploración y aprovechamiento por unidad de volumen de suelo (Gautam *et al.*, 2003). Sin embargo, en sistemas manejados, como las plantaciones forestales, la distribución de raíces después del establecimiento de la planta en campo es influenciada por la forma de producción de la planta en vivero (Krasowski y Owens, 2000; South y Donald, 2002). Por ejemplo, la arquitectura de la raíz es afectada por prácticas de poda

Recibido: Junio, 2006. Aprobado: Junio, 2007.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 675-685. 2007.

ABSTRACT

Chemical root pruning is a cultural practice in nurseries to improve fibrousness of the root system, among other purposes. In this study nitrogen uptake was quantified in *Pinus greggii* Engelm. six years after chemical root pruning was applied in a nursery. The treatments were: bag and carpet impregnated with copper (T1); bag impregnated with copper (T2); carpet impregnated with copper (T3); bag without impregnated copper (T4, control). N uptake was determined using a sample of 20 trees after soil application of a ^{15}N marked source $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and enriched to 49.2%. It was found that T2 caused better N recovery from the marked source in young foliage ($p \leq 0.01$). There were no statistical differences among treatments for water status, tree growth, and dry aerial matter production. The analyses of young foliage indicated that chemical root pruning had positive effects in N uptake six years after planting in the field. It is thus inferred that this practices is beneficial during the few first years of establishment in forest plantations.

Key words: *Pinus greggii*, fine roots, ^{15}N .

INTRODUCTION

The root functions of absorption and transport are vital to the development and growth of plants, besides serving to anchor and support their aerial part (Pritchett, 1986). Distribution of the root system determines a plant's capacity to explore and use soil per volume unit (Gautam *et al.*, 2003). However, in managed systems, such as forest plantations, the distribution of roots after establishment in the field is affected by the manner in which the plant is produced in the nursery (Krasowski and Owens, 2000; South and Donald, 2002). For example, root architecture is affected by chemical pruning practices during the plant production stage (Lindstrom and Rune, 1999). The most fibrous root systems allow the plant to be more efficient in absorbing water and nutrients for its growth (Pritchett, 1986). Knowledge of nutrient consumption and absorption dynamics of the root system

química durante la etapa de producción de la planta (Lindstrom y Rune, 1999). Los sistemas radicales más fibrosos permiten a la planta ser más eficiente en la obtención de agua y nutrimentos para su crecimiento (Pritchett, 1986). Conocer el consumo de nutrimentos y la dinámica de absorción del sistema radical permite afinar técnicas y establecer recomendaciones para un buen manejo de las plantas en campo (Bertsch, 2005). Las recomendaciones son relevantes especialmente si resultan de estudios a mediano plazo para conocer la conveniencia de ciertas prácticas en vivero.

Una técnica que ayuda a mejorar el sistema radical de la planta en vivero es la poda química aplicando compuestos de cobre en las paredes del contenedor, para modificar la estructura y morfología del sistema radical (Arnold y Struve, 1989). Además, con las prácticas que mejoran la morfología de raíces se reduce el problema de espiralamiento, induciendo la formación de un sistema radical más fibroso y con mayor número de raíces finas que permiten una elevada absorción, exploración y anclaje una vez establecidas en campo, obteniendo mayores porcentajes de supervivencia y crecimiento inicial (South and Donald, 2002).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de absorción de nitrógeno (N) en *Pinus greggii* Engelm. en campo, con diferentes prácticas de poda de raíz en la fase de producción de planta, que generaron diferentes densidades de la raíz (Barajas *et al.*, 2004). Los datos de este estudio corresponden a una evaluación realizada seis años después de establecida la planta en campo. La hipótesis nula fue que la absorción de N vía raíz en plantas establecidas en campo es igual en todos los tratamientos de poda química de raíz. Adicionalmente, se midió el estado hídrico de las plantas por siete meses, suponiendo que un sistema radical eficiente facilita la superficie de contacto entre la raíz y el suelo, y por tanto influye en el estado hídrico de la planta. Para relacionar los efectos de los tratamientos en términos de biomasa, se cuantificó la materia seca aérea producida en cada tratamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

La plantación se ubica en la localidad de Cuaunepantla, Municipio de Acaxochitlán en el Estado de Hidalgo, a 20° 09' 52" N y 98° 13' 31" O, y a una altitud de 2200 m. El terreno tiene una pendiente promedio de 2%. El clima es templado frío, con una temperatura media anual de 16° C y una precipitación media anual de 800 a 1000 mm. De acuerdo con la clasificación FAO (1988), el suelo es un Cambisol éutrico caracterizado por un horizonte superficial delgado y un sub-horizonte con desarrollo moderado de estructura. El contenido de materia orgánica en los últimos 20 cm va de 3.2 a

would allow techniques to be refined and recommendations established for good plant management in the field (Bertsch, 2005). Recommendations are relevant, especially if they are the result of medium-term studies, to determine whether certain nursery practices are favorable.

One technique that helps improve the plant root system in the nursery is chemical pruning applying copper compounds on the inner walls of the container to modify the structure and morphology of the root system (Arnold and Struve, 1989). Furthermore, with practices that improve root morphology, the problem of spiraling roots is reduced, inducing the formation of a more fibrous root system with a larger number of fine roots which enhance absorption, exploration and anchorage once established in the field and thus favoring higher survival percentages and greater initial growth (South and Donald, 2002).

The objective of this study was to evaluate N uptake efficiency in *Pinus greggii* Engelm. in the field which had undergone different root pruning practices during the plant production phase, generating differences in root densities (Barajas *et al.*, 2004). The data of this study corresponded to an evaluation done six years after plants were established in the field. The null hypothesis was that N uptake through roots in plants established in the field is equal in all of the treatments of chemical root pruning. In addition, plant water status was measured for seven months, assuming that an efficient root system facilitates surface contact between root and soil, and therefore influences plant water status. Aerial dry matter produced in each treatment was quantified in order to relate the effects of the treatments in terms of biomass.

MATERIALS AND METHODS

Location of the study area

The plantation is located in Cuaunepantla, Municipality of Acaxochitlán, State of Hidalgo, 20° 09' 52" N and 98° 13' 31" W, at an altitude of 2200 m. The terrain has an average slope of 2%. Climate is cold temperate with a mean annual temperature of 16 °C and mean annual precipitation of 800 to 1000 mm. According to the FAO (1988) classification, the soil is a eutric Cambisol characterized by a thin surface horizon and a sub-horizon with moderate structural development. Contents of organic matter vary from 3.2 to 4.4% in the last 20 cm. Soil texture at 0-20 cm is loam to clay loam, and at 20 to 40 cm it is clay loam. The changes in clay between the top horizon and the sub-horizon are less than 5%. Bulk densities are 0.8 and 1.0 Mg m⁻³ for 0-20 and 20-40 cm. The upper 20 cm of soil show high and moderate quantities of total N (0.2%) and extractable phosphorus (Bray-1) (19 ppm). Based on moisture regime, moderate organic matter content and low bulk density, these soils are apt for establishing forest species, particularly for the species under study.

4.4%. La textura del suelo de 0-20 cm es franco a franco-arcilloso y de 20 a 40 cm es franco-arcillosa. Los cambios de arcilla entre el horizonte superficial y el sub-horizonte son menores a 5%. Las densidades aparentes son 0.8 y 1.0 Mg m⁻³ para 0-20 y 20-40 cm. Los 20 cm superiores del suelo muestran cantidades altas y moderadas de N total y fósforo (0.2%) extractable (Bray-1; 19 ppm). Por el régimen de humedad, el contenido moderado de materia orgánica y la densidad aparente baja, estos suelos son aptos para el establecimiento de especies forestales, en particular para la especie en estudio.

Producción de planta y características de la plantación

De octubre de 1998 a junio de 1999 se produjo en vivero planta de *P. greggii* Engelm. con las siguientes podas químicas de raíz: bolsa y tapete impregnados con cobre (T1); bolsa impregnada con cobre (T2); tapete impregnado con cobre (T3); bolsa sin impregnación de cobre (T4, testigo). La información complementaria de esta fase del experimento puede consultarse en Barajas *et al.* (2004). La plantación se estableció en julio de 1999 en marco real y con un espaciamiento de 1×1 m. El diseño experimental en campo fue completamente al azar con los cuatro tratamientos mencionados y cinco unidades experimentales con 18 árboles cada una (360 árboles en total). Para esta investigación se seleccionaron cinco de cada tratamiento y cada uno se consideró como una unidad experimental (total 20 árboles). La selección fue con base en el árbol medio de cada tratamiento, con diámetro normal (a 1.3 m del suelo) representativo de cada tratamiento (Lieth, 1975).

En una evaluación realizada por Barajas *et al.* (2004) se encontró que los tratamientos con bolsa impregnada con cobre presentaron mayor número de raíces finas (< 2 mm) por unidad de volumen (Cuadro 1).

Fertilización de árboles con fuente marcada de N

Para estudiar el proceso de absorción de N se empleó una fuente marcada con ¹⁵N. Además de seleccionar los árboles con base en el diámetro normal medio de cada tratamiento, se seleccionaron árboles rodeados de cuatro árboles vecinos vivos para mantener una presión de competencia similar en cada repetición. La mortalidad de árboles al momento del experimento fue menor a 8%. Para medir la eficiencia en absorción radical se preparó una solución con ¹⁵N cuya fuente fue (¹⁵NH₄)₂SO₄ enriquecida a 49.2%. La dosis fue 0.957 g

Plant production and plantation characteristics

From October 1998 to June 1999, *P. greggii* Engelm. plants were produced in nursery with the following chemical root prunings: bag and carpet impregnated with copper (T1); bag impregnated with copper (T2); carpet impregnated with copper (T3); bag without copper impregnation (T4, control). The complementary information of this phase of the experiment can be consulted in Barajas *et al.* (2004). The plantation was established in July 1999 with spacing of 1×1m. The experimental design in the field was completely random for the four treatments and five experimental units of 18 trees each (total, 360 trees). For this study five trees were selected from each treatment and each tree was considered to be one experimental unit (total, 20 trees). Selection was based on the average tree of each treatment, with normal diameter at breast height (1.3 m from the ground) representative of each treatment (Lieth, 1975).

In an evaluation done by Barajas *et al.* (2004), it was found that the treatments with bags impregnated with copper had a larger number of fine roots (< 2 mm) per unit of volume (Table 1).

Fertilization of trees with marked N source

To study the process of N uptake, a source marked with ¹⁵N was used. Besides selecting trees based on average diameter at breast height from each treatment, selected trees were surrounded by four live neighboring trees to maintain similar competition in each replication. Tree mortality at the time of the experiment was less than 8%. To measure root uptake efficiency, a solution was prepared with ¹⁵N whose source was (¹⁵NH₄)₂SO₄ enriched to 49.2%. The dosage was 0.957 g (¹⁵NH₄)₂SO₄ tree⁻¹, which was diluted in 3.1 L of water to assure uniform distribution around the tree over an area of approximately 3.14 m². The marked source was applied on July 26, 2004, when the new aciculae were developed. To apply the ¹⁵N solution, branches and litter around the tree trunk were removed to allow the solution to come into contact with the mineral soil and prevent retention of the solution in the surface organic matter.

Foliage sampling

On February 11, 2005 (seven months after fertilizer application), foliage samples (approximately 50 g) were collected from marked

**Cuadro 1. Evaluación preliminar (presencia de raíces finas en el experimento).
Table 1.**

Tratamiento	Producción de raíz a base de:	†Número de raíces finas/dm ³
T1	Bolsa y tapete impregnados con cobre	41a
T2	Bolsa impregnada con cobre	40a
T3	Tapete impregnado con cobre	28b
T4	Bolsa tradicional sin cobre	23b

Barajas *et al.* (2004).

† Raíces <2mm. El número de raíces y su masa por unidad de volumen presentaron la misma tendencia (p≤0.05).

(¹⁵NH₄)₂SO₄ árbol⁻¹, diluida en 3.1 L de agua para asegurar una distribución uniforme alrededor del árbol en una superficie aproximada de 3.14 m². La fuente marcada se aplicó el 26 de julio de 2004, cuando las acículas nuevas estaban desarrolladas. Para aplicar la solución de ¹⁵N se retiraron las ramas y hojarasca alrededor del tallo del árbol, para permitir que la solución entrara en contacto con el suelo mineral, evitando la retención de la solución en el material orgánico superficial.

Muestreo de follaje

El 11 de febrero de 2005 (siete meses después de aplicar el fertilizante), se recolectaron muestras de follaje (aproximadamente 50 g) de los árboles marcados, separando dos porciones de crecimiento: follaje joven (formado en la estación de crecimiento de 2004) y follaje maduro (formado en la estación de crecimiento de 2003). También se tomaron muestras foliares de cinco árboles sin marcar. Las muestras se secaron 72 h en estufa a 60 °C. Luego se extrajeron 10 g de cada muestra para pulverizar en un molino de HP ¼ (Thomas Scientific 800-345-2100. Mod. 3383-L10. GE Motors Industrial Systems) con tamiz 40 integrado y un molino de balines. Se pesaron 0.7 a 0.9 mg de follaje pulverizado en cápsulas de estaño y se enviaron al laboratorio de isótopos de la Universidad de California, Davis, donde se realizó el análisis de composición isotópica (δ¹⁵N) (Ehlenringer y Rundel, 1989).

Recuperación de ¹⁵N en follaje

La recuperación de ¹⁵N en follaje se calculó con las siguientes ecuaciones (Cabrera y Kissel, 1989):

$$Ndf = \left(\frac{\% \text{ de átomo en exceso en la muestra}}{\% \text{ de átomo en exceso en la fuente}} \right) * 100 \quad (1)$$

Ndf = nitrógeno derivado de la fuente (%)

$$MN = (\text{Masa de componente}) * (\text{concentración de N del componentes}) * 0.001 \quad (2)$$

MN = masa de nitrógeno en componente
0.01 = factor de transformación de % a masa

$$\text{Masa de } Ndf = Ndf * MN * 0.01 \quad (3)$$

$$\%NR = \left(\frac{\text{Masa de } Ndf}{\text{Masa de nitrógeno aplicada en el fertilizante}} \right) * 100\% \quad (4)$$

%NR = porcentaje de nitrógeno recuperado

Potencial hídrico

Otro indicador indirecto del grado de contacto entre la raíz y el suelo es el potencial hídrico. Un buen sistema radical promueve una

separación de dos porciones de crecimiento: follaje joven (formado en la 2004 growing season) and mature foliage (formed in the 2003 growing season). Also, samples were taken from five unmarked trees. The samples were dried in an oven at 60 °C for 72 h. Then, 10 g were extracted from each sample and pulverized in a ¼ HP mill (Thomas Scientific 800-345-2100, Mod. 3383-L10, GE Motors Industrial Systems) with integrated #40 screen and ball mill. Between 0.7 and 0.9 mg of pulverized foliage were weighed in tin capsules and sent to the isotope laboratory of the University of California at Davis where the analysis of isotopic (d¹⁵N) composition (Ehlenringer and Rundel, 1989) was conducted.

¹⁵N recovery in foliage

Recovery of ¹⁵N in foliage was estimated from the following equations (Cabrera and Kissel, 1989):

$$Ndf = \left(\frac{\% \text{ surplus atom in the sample}}{\% \text{ surplus atom in the source}} \right) * 100 \quad (1)$$

Ndf = nitrogen derived from the source (%)

$$MN = (\text{Component mass}) * (\text{N concentration of components}) * 0.001 \quad (2)$$

MN = component nitrogen mass
0.01 = factor of transformation from % to mass

$$Ndf \text{ mass} = Ndf * MN * 0.01 \quad (3)$$

$$\%NR = \left(\frac{Ndf \text{ mass}}{\text{Nitrogen mass applied in fertilizer}} \right) * 100\% \quad (4)$$

%NR = percentage of recovered nitrogen

Water potential

Another indirect indicator of the degree of contact between roots and soil is water potential. A good root system promotes a larger area of contact between soil and root (Hacke *et al.*, 2001). For this reason, as a physiological aspect of plants, monthly water potential was determined using the method Noon stem water potential (Gómez *et al.*, 2002; Williams and Araujo, 2002). This method consists of measuring water potential in leaves that are not transpiring and is based on the assumption that the potential of a non-transpiring leaf is balanced with that of the stem xylem, after covering the leaf for 2 h with aluminum foil; the measurement of water potential in a non-transpiring leaf corresponds to the stem water potential (McCutchan and Shackel, 1992). Due to rapid changes in atmospheric vapor pressure and to the time required to measure water potential, a single measurement per tree was considered, selecting a fascicle of the upper part of the crown growing on the first ramification of the main stem.

mayor superficie de contacto entre el suelo y la raíz (Hacke *et al.*, 2001). Por esta razón, como aspecto fisiológico de las plantas se determinó su potencial hídrico mensual mediante el método Potencial hídrico del tallo al medio día (Gómez *et al.*, 2002; Williams y Araujo, 2002). Este método consiste en medir el potencial hídrico en hojas que no estén traspirando y se basa en el supuesto de que el potencial de una hoja sin transpirar se equilibra con el xilema del tallo, después de cubrir la hoja por 2 h con papel aluminio; la medición del potencial hídrico en una hoja sin transpirar corresponde al potencial del tallo (McCutchan y Shackel, 1992). Debido a los cambios rápidos de presión de vapor de la atmósfera y al tiempo requerido para realizar la medición del potencial hídrico sólo se consideró una medición por árbol, seleccionando un fascículo de la parte superior de la copa creciendo sobre la primera ramificación de tallo principal del árbol.

Crecimiento arbóreo

Para evaluar el crecimiento en cada tratamiento se midieron características dasométricas: diámetro normal (a 1.3 m del suelo), altura total y biomasa aérea. Esta última variable se determinó con el método de cosecha, en forma similar al procedimiento usado por Acosta-Mireles *et al.* (2002). Se separaron y pesaron los componentes del árbol en campo y se recolectó una muestra de cada componente para determinar el contenido de humedad en laboratorio. Con los datos de contenido de humedad y de peso fresco se calculó el peso seco de los componentes.

Análisis estadístico

Con los datos del porcentaje de N recuperado, diámetro normal, altura total y biomasa aérea se realizó un análisis con el procedimiento ANOVA (SAS, 1998) y la prueba de la Diferencia Mínima Significativa para comparar medias (DMS; $p \leq 0.10$). Se seleccionó esta prueba y este nivel por ser un experimento de campo donde la uniformidad de las unidades experimentales y la variabilidad espacial es mayor que en experimentos de vivero, donde hay un control más riguroso de los factores que afectan el crecimiento. Para considerar las diferencias por el tamaño de los árboles se realizó un análisis de covarianza para la variable porcentaje de recuperación de N.

RESULTADOS

Porcentaje de nitrógeno recuperado

El ^{15}N aplicado al suelo llegó al follaje en los cuatro tratamientos (Figura 1). Esto se deduce por los valores de % átomo que muestra el tratamiento de referencia (REF), el cual es cercano a cero, corroborando que no hubo contaminación de la fuente marcada en los árboles utilizados como referencia.

La recuperación de N en follaje joven fluctuó de 0.26 a 0.75 %, con un promedio de 0.4% (Figura 2). Con T2 (bolsa impregnada con cobre) hubo mayor

Tree growth

To evaluate growth in each treatment, dasometric characteristics, were measured: diameter at breast height (1.3 m from the ground) total height and aerial biomass. Aerial biomass was determined by the harvest method, similar to the procedure used by Acosta-Mireles *et al.* (2002). Tree components were separated and weighed and samples were taken of each component to determine moisture content in the laboratory. With the moisture content and fresh weight data, component dry weight was estimated.

Statistical analysis

With the data of percentage of recovered N, diameter at breast height, total height, and aerial biomass, an ANOVA (SAS, 1998) was performed and means were compared using the least significant difference (DMS; $p \leq 0.10$). The test and level were selected since in a field experiment, uniformity of the experimental units and special variability is greater than in the nursery, where control of the factors that affect growth is more rigorous. To take into account differences in tree size, an analysis of covariance was performed for the variable percentage of N recovery.

RESULTS

Percentage of recovered nitrogen

^{15}N applied to the soil reached the foliage of trees in the four treatments (Figure 1). This is deduced from the values of % atom shown by the reference treatment (REF), nearly zero, corroborating that there was no contamination of the marked source in the reference trees.

N recovery in young foliage fluctuated between 0.26 and 0.75 %, with an average of 0.4% (Figure 2). With T2 (bag impregnated with copper) there was more N recovery in young foliage ($p \leq 0.10$) than T4 (non-impregnated bag). N recovery in T4 was the lowest of the four. For mature foliage, N recovery fluctuated between 0.94 and 1.45 %, but the differences were not significant. The results of the analysis of covariance were similar to those of the analysis of variance, indicating that the initial size of the tree had no influence in the amount of N recovered in the foliage.

Water potential

The lowest values (greater water stress) occurred in January (Figure 3). Water potential of the four treatments, in general, exhibited a similar trend during the seven measurement dates. Nevertheless, in December and January, when water potential was lowest, T2 had the highest potentials.

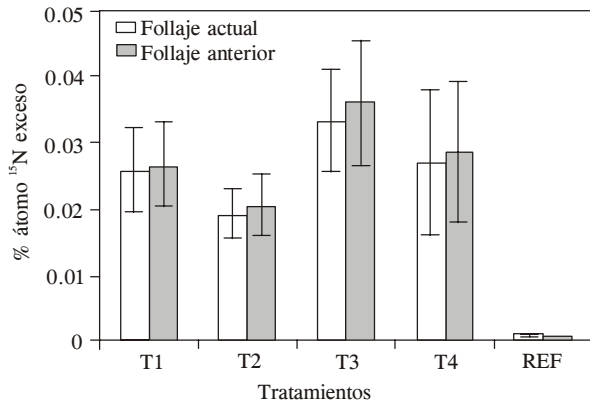


Figura 1. Porcentaje átomo ¹⁵N_{exceso} en los cuatro tratamientos de poda química de raíz en *Pinus greggii*: bolsa y tapete impregnados con cobre (T1), bolsa impregnada con cobre (T2), tapete impregnado con cobre (T3) y bolsa sin impregnación de cobre (T4, testigo). El tratamiento REF muestra la medida de cinco árboles donde no se aplicó ¹⁵N. Las líneas de las barras indican el error estándar.

Figure 1. Percentage ¹⁵N_{surplus} atom in the four treatments of chemical root pruning in *Pinus greggii*: bag and carpet impregnated with copper (T1), bag impregnated with copper (T2), carpet impregnated with copper (T3), and non-impregnated bag (T4, control). The REF treatment shows the measurement of five trees to which ¹⁵N was not applied. The lines on the bars indicate the standard error.

recuperación de N en follaje joven ($p \leq 0.10$), en comparación con T4 (bolsa sin impregnar). La recuperación de N en el tratamiento T4 fue la menor de los cuatro. Para el follaje maduro la recuperación de N fluctuó de 0.94 a 1.45%, pero las diferencias no fueron significativas. Los resultados del análisis de covarianza fueron similares a los del análisis de varianza, indicando que el tamaño inicial del árbol no influyó en la cantidad de N recuperado en el follaje.

Potencial hídrico

Los valores más negativos (mayor agobio hídrico) ocurrieron en enero (Figura 3). El potencial hídrico, en general, tuvo una tendencia similar en las siete fechas de medición en los cuatro tratamientos. No obstante, en diciembre y enero, cuando ocurrió el potencial más bajo, T2 mostró los potenciales más altos.

Crecimiento y producción de biomasa

No hubo diferencias significativas en altura total y diámetro normal; es decir, tres años después de que Barajas *et al.* (2004) encontraron diferencias en el sistema radical de estos árboles, y a seis años de su establecimiento en campo, no se detectó un mayor crecimiento en T1 y T2. Los valores de diámetro normal

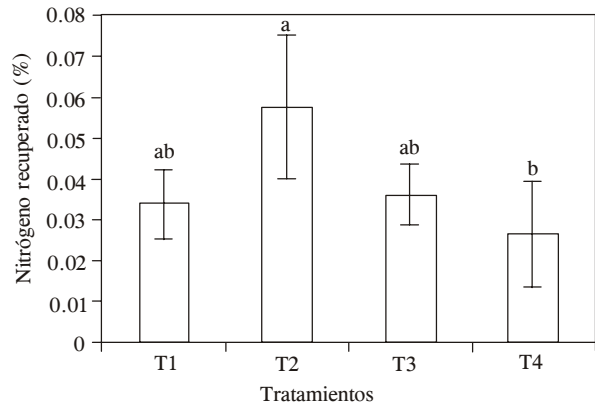


Figura 2. Porcentaje de nitrógeno recuperado en follaje actual para los cuatro tratamientos de poda química de raíz en *Pinus greggii* marcados fertilizados con ¹⁵N. Las líneas en las barras indican el error estándar; las letras diferentes indican valores estadísticamente diferentes ($p \leq 0.10$).

Figure 2. Percentage of nitrogen recovered from present foliage for the four chemical root pruning treatments (see Figure 1) of *Pinus greggii* marked and fertilized with ¹⁵N. The lines on the bars indicate standard error; different letters indicate statistically different values ($p \leq 0.10$).

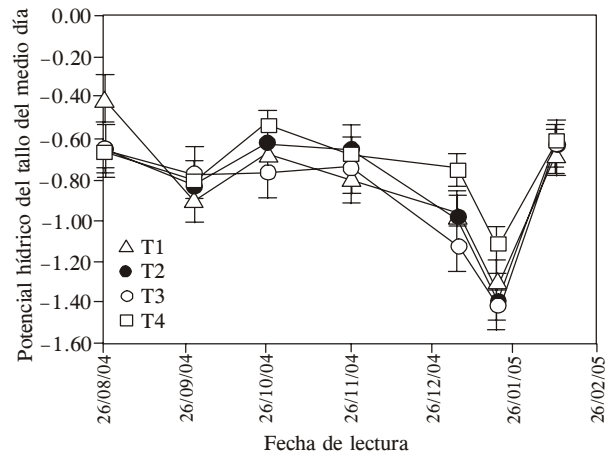


Figura 3. Potencial hídrico del tallo del medio día medido para los cuatro tratamientos de poda química de raíz (ver Figura 1) en *Pinus greggii*. Las líneas en las barras indican el error estándar.

Figure 3. Stem water potential at noon measured for the four chemical root pruning treatments (see Figure 1) in *Pinus greggii*. The lines on bars indicate standard error.

Growth and biomass production

There were no significant differences in total height and diameter at breast height; that is, three years after Barajas *et al.* (2004) found differences in the root system of these trees, and six years after establishment in the field, in T1 and T2 further growth was not detected. Diameter at breast height oscillated between 4.27 and

oscilaron entre 4.27 y 7.7 cm y la altura total entre 3 y 6 m. No hubo diferencias significativas entre tratamientos para biomasa aérea total (por árbol, 10.2, 7.8, 7.3 y 6.8 kg para T2, T4, T1 y T3).

DISCUSIÓN

Porcentaje de nitrógeno recuperado

La recuperación media de N en follaje joven en el presente trabajo (0.4%) fue menor a la obtenida por Preston y Mead (1994) quienes calcularon, en *Pinus contorta*, una recuperación de 1.9 a 10.1% en follaje. Staples *et al.* (1999) obtuvieron en brinzales de *Picea glauca* (Moench) Voss, una recuperación menor de 1% de N en biomasa aérea. Chang y Preston (2000) señalan que las plantas leñosas absorben una mínima cantidad del N aplicado debido a la demanda de N para otros procesos del suelo como inmovilización y lixiviación. La recuperación de N en follaje en estudios con fuentes marcadas, con frecuencia es 1 a 2% (Mead y Pritchett 1975; Foster *et al.*, 1985; Millard y Proe, 1993).

La mayor recuperación de N en el follaje maduro con respecto al follaje joven es un resultado contrario al esperado, ya que generalmente el tejido nuevo, que demanda altas cantidades de N, supera a los otros componentes de la planta por la translocación de este elemento a tejido nuevo (Binkley, 1986; Chang *et al.*, 1995). La tendencia encontrada en este trabajo no es fácil de explicar. Es posible que en estos árboles haya ocurrido un menor desplazamiento de N del follaje viejo al de reciente formación (Weinbaum *et al.*, 1978; Fife y Nambiar, 1984; Nambiar y Fife, 1991). Otra posible explicación es que la fecha o estación en que se aplicó el ¹⁵N influyó en los resultados. Al comparar el presente estudio con los de otros autores, se puede observar que los tiempos de duración de sus estudios mayores son a un año, lo cual garantizó una mejor redistribución de N para cada periodo vegetativo (Turner, 1977; Nambiar y Bowen, 1986; Mead y Preston, 1994). No obstante, en experimentos de largo plazo con coníferas, la mayor acumulación de N de una fuente marcada aplicada al suelo ocurre en follaje joven y durante el primer año; luego la señal de la fuente marcada de N disminuye progresivamente y desde el tercer año las diferencias entre hojas jóvenes y maduras desaparecen (Nõmmik y Larsson, 1992). Aunque generalmente se espera mayor recuperación de N en follaje joven, las diferencias pueden ser no significativas en algunos casos; por ejemplo, Heilman *et al.* (1982) dividieron el follaje en años de crecimiento y calcularon la cantidad de N recuperado correspondiente a cada sección, sin encontrar diferencias significativas entre follaje nuevo y follaje de un año.

7.7 cm, and total height between 3 and 6 m. There were no significant differences among treatments for total biomass (per tree, 10.2, 7.8, 7.3 and 6.8 kg for T2, T4, T1, and T3).

DISCUSSION

Percentage of recovered nitrogen

The mean N recovery in young foliage found in our study (0.4%) was lower than that obtained by Preston and Mead (1994), who calculated 1.9 and 10.1% recovery in foliage of *Pinus contorta*. Staples *et al.* (1999) obtained a recovery of less than 1% in aerial biomass of natural stand *Picea glauca* (Moench) Voss. Chang and Preston (2000) point out that woody plants absorb a very small amount of applied N due to the N demand for other soil processes such as immobilization and leaching. N recovery from foliage in studies with marked sources is frequently 1 to 2% (Mead and Pritchett, 1975; Foster *et al.*, 1985; Millard and Proe, 1993).

Most N recovery in mature foliage, compared with young foliage, is an unexpected result since generally new tissue, which demands high amounts of N, surpasses other plant components due to translocation of this element to new tissue (Binkley, 1986; Chang *et al.*, 1995). The trend found in our work is not easy to explain. It is possible that in these trees less N was transported from old foliage to that of recent formation (Weinbaum *et al.*, 1978; Fife and Nambiar, 1984; Nambiar and Fife, 1991). Another possible explanation is that the date or season in which ¹⁵N was applied affected the results. Comparing our study with those of other authors, it can be seen that the duration of their studies is more than a year, which would guarantee better redistribution of N for each vegetative period (Turner, 1977; Nambiar and Bowen, 1986; Mead and Preston, 1994). Nevertheless, in long-term studies with conifers, the greatest N accumulation from a marked source applied to the soil occurs in young foliage during the first year; later, the signal from the marked N source diminishes progressively and as of the third year the differences between young and mature leaves disappear (Nõmmik and Larsson, 1992). Although generally greater N recovery in young foliage is expected, the differences may be non-significant in some cases. For example Heilman *et al.* (1982) divided the foliage in years of growth and estimated the amount of recovered N corresponding to each section, finding no significant differences between new foliage and one-year-old foliage.

With T2 (polyethylene bag impregnated with copper) there was better N absorption than T4 (non-pruned

Con T2 (bolsa de polietileno impregnada con cobre) hubo mejor absorción de N en comparación con T4 (testigo sin poda), lo cual concuerda con el trabajo de Barajas *et al.* (2004) quienes encontraron mayor número de raíces finas en T2, por lo que se infiere mayor capacidad de exploración y aprovechamiento de agua y nutrimentos por unidad de volumen de suelo. Sin embargo, identificaron a T1 con alta densidad de raíces lo cual no es consistente con los resultados de absorción de N en el presente estudio. Los resultados sugieren que el beneficio de la poda desaparece en los primeros años si las condiciones biofísicas del sitio son adecuadas para el crecimiento de los árboles.

Potencial hídrico

No hubo diferencias significativas entre tratamientos para el potencial hídrico; en diciembre y enero hubo mayor agobio hídrico, lo cual se reflejó en potenciales de -1.4 MPa en enero. Los valores obtenidos son comparables con los encontrados por Gómez *et al.* (2002) quienes reportaron potenciales de -1.7 MPa para *P. ponderosa* var. *ponderosa* Dougl. Ex Laws, en un clima mediterráneo. Debe considerarse que el estrés hídrico varía entre especies, época del año y métodos de medición. Perry *et al.* (1994) encontraron en *P. taeda* L. potenciales de hasta -1.5 MPa en junio, valores comparables del presente estudio. Sin embargo, para establecer escalas de comparación de estrés hídrico es conveniente comparar con la misma especie, métodos de medición y condiciones ambientales. De los resultados del presente estudio, comparados con los de Gómez *et al.* (2002) y Powers y Ferrell (1996) se deduce que *P. greggii* tuvo en enero un estrés comparable al que experimentan plantaciones jóvenes de pino ponderosa en agosto en California. Según Vilagrosa *et al.* (2003), en hojas transpirando, valores mayores a -3.0 MPa se consideran altos, pero los datos del presente trabajo indican que es poco probable encontrar potenciales tan negativos en el área de estudio, ya que desde el punto de vista biofísico el sitio de la plantación es muy favorable para la especie estudiada. La disminución del potencial el 26 de enero de 2005 (Figura 3) debió resultar de un descenso en la humedad relativa e incremento en la temperatura, lo que a su vez modificó el déficit de presión de vapor. Desafortunadamente no se tiene una estación meteorológica en el lugar del estudio para sustentarlo.

Crecimiento y producción de biomasa

Aunque la producción de biomasa es numéricamente mayor en T2, no hay evidencia estadística para concluir

control), coincidiendo con el estudio de Barajas *et al.* (2004), who found a larger number of fine roots in T2, and therefore inferred greater capacity of exploration and water and nutrient use per volume unit of soil. However, T1 was identified with high root density, which is not consistent with N absorption results in our study. The results suggest that the benefit of pruning disappears in the first few years if the biophysical conditions of the site are adequate for tree growth.

Water potential

Water potential found in our study was not significantly different among treatments; in December and January there was greatest water stress, reflected in potentials of -1.4 MPa in January. The values found in our study are comparable with those found by Gómez *et al.* (2002), who reported potentials of -1.7 MPa for *P. ponderosa* var. *ponderosa* Dougl. Ex Laws in a Mediterranean climate. It should be considered that water stress varies among species, season of the year, and measurement methods. Perry *et al.* (1994) found potentials of up to -1.5 MPa in *P. taeda* L. in June, values comparable with those of our study. However, to establish water stress comparison scales, it is recommendable to compare with the same species, measurement methods, and environmental conditions. From the results of our study, compared with those of Gómez *et al.* (2002) and Powers and Ferrell (1996), it is deduced that *P. greggii* underwent stress in January, comparable to that suffered by young plantations of ponderosa pine in August in California. According to Vilagrosa *et al.* (2003), in transpiring leaves, values above -3.0 MPa are considered high, but the data from our work indicate that it is not probable to find such negative potentials in our study site, since from a biophysical perspective the plantation site is quite favorable for the species studied. The decrease in potential on January 26, 2005 (Figure 3), most probably resulted from a fall in relative humidity and a rise in temperature, which modified the vapor pressure deficit. Unfortunately, there is no weather station in the study site to sustain this.

Growth biomass production

Although biomass production is numerically higher in T2, there is no statistical evidence to conclude that T2 accumulated more biomass. The trend of T2 stands out in all of the variables of the study, but the differences were not statistically significant. Therefore, it is concluded that although chemical pruning favors greater N absorption in young foliage, its effect is not as intense in other variables, such as growth and water status

que T2 acumuló mayor biomasa. La tendencia del T2 destaca en todas las variables del estudio, pero no hubo diferencias significativas. Por tanto, se concluye que aunque la poda química favorece una mayor absorción de N en follaje joven, su efecto no tiene la misma intensidad en variables como el crecimiento y el estado hídrico después de seis años. Es posible que a seis años de establecidas las plantas en campo las diferencias se hayan reducido a tal grado que no hubo significancia. El presente trabajo coincide con el de Chamshama y Hall (1987) quienes podaron en vivero la raíz de brinzales de *Eucalyptus camadulensis* y después de un año de establecidos en campo no encontraron diferencia estadística en el crecimiento en altura y diámetro. De manera similar, Cetina *et al.* (2002) reportaron que la poda mecánica de raíz de *P. greggii* en su primer año de establecida en campo no mejoró el crecimiento de las plántulas. Es probable que si la plantación se hubiera realizado en una zona más seca los efectos de la poda hubieran sido más notorios, ya que la productividad de *P. greggii* se modifica notablemente con las condiciones de temperatura y humedad del sitio (García *et al.*, 2004). Esta especulación se basa en el hecho de que en los meses de potencial hídrico más negativo (diciembre y enero), se mostró mayor dispersión entre las medias de los tratamientos y T2 tiende a presentar potenciales más altos. Además, los efectos de las prácticas de vivero en años después de la plantación parecen ser modificados por la textura del suelo. South y Donald (2002) encontraron diferencias en crecimiento de *P. taeda* cinco años después de haber practicado la poda mecánica en vivero, aunque las diferencias fueron significativas sólo en suelos limosos y no en suelos arenosos. En el área de estudio los suelos son franco a franco-arcillosos y la precipitación media anual (800-1000 mm) pueden favorecer la disponibilidad de agua en la época de crecimiento. Es probable que el suelo del área de estudio (franco a franco-arcillosa) y adecuada disponibilidad de agua durante el año no presente resistencia mecánica alta para limitar el crecimiento de las raíces (Gómez *et al.*, 2002) y, por tanto, se haya minimizado el efecto benéfico de la poda química efectuada en la fase de producción de planta.

Respecto a las variables, T2 sólo muestra una tendencia de mejor potencial hídrico y mayor biomasa. Es probable que las ventajas del sistema de producción de planta desaparezcan con el tiempo. La importancia de una poda química de raíz es asegurar un buen establecimiento de plantas en los primeros años. En el lugar donde se estableció el experimento, las condiciones ambientales pueden considerarse benignas la mayor parte del año; ésto se basa en las tendencias de potencial hídrico observadas.

after six years. It is possible that, after six years of establishment in the field, the differences have decreased to such a degree that there is no significance. This coincides with the work of Chamshama and Hall (1987) who, in the nursery, root pruned naturally produced *Eucalyptus camadulensis* and, after a year in the field, found no statistical difference in growth in height and diameter. In a similar manner, Cetina *et al.* (2002) reported that mechanical root pruning *P. greggii* in the first year they are established in the field did not improve seedling growth. It is probable that if the plantation had been done in a drier zone, the effects of pruning might have been more notable since productivity of *P. greggii* is modified notably under the temperature and moisture conditions of the site (García *et al.*, 2004). This speculation is based on the fact that in those months (December and January) water potential is most negative, there was greater dispersion among the means of the treatments, and T2 tended to have higher potentials. Also, the effects of nursery practices in the years after plantation seem to be modified by soil texture. South and Donald (2002) found differences in growth of *P. taeda* five years after having practiced mechanical pruning in the nursery, although the differences were significant only in silty soils and not in sandy soils. In the study area the soils are loam to clay loam and annual mean precipitation (800-1000 mm), can favor water availability in the growing period. It is probable that the soil of the study area (loam and clay loam) and adequate availability of water during the year does not offer high mechanical resistance which would limit root growth (Gómez *et al.*, 2002) and, therefore, the beneficial effect of chemical pruning done during the plant production phase is minimized.

Regarding the variables, T2 only shows a tendency of better water potential and greater biomass. It is probable that the advantages of the plant production system disappear over time. The importance of chemical root pruning is to assure good establishment of the plants in the first few years. In the site where the experiment was set up, environmental conditions can be considered benign for most of the year; this is based on the water potential tendencies observed.

CONCLUSIONS

The treatment with bag impregnated with copper (T2) was more efficient in N uptake with a larger percentage of N recovery in young foliage. However, there was no statistical evidence to sustain that chemical pruning influences water status and accumulation of aerial biomass six years after plants were established in the field. The data suggest that this type of studies should focus on environments limited by moisture.

CONCLUSIONES

El tratamiento con bolsa impregnada con cobre (T2) presentó una mayor eficiencia en la absorción de N, con un mayor porcentaje de recuperación en el follaje joven. Sin embargo, no hubo evidencias estadísticas de que la poda química influyera en un mejor estado hídrico y mayor acumulación en biomasa aérea seis años después de establecidas las plantas en campo. Los datos sugieren que este tipo de estudios deben enfocarse a ambientes limitados por humedad.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Arnold, M. A., and D. K. Struve. 1989. Cupric carbonate controls green ash root morphology and root growth. *HortScience* 24(2): 262-264.
- Barajas R., J. E., A. Aldrete, J. J. Vargas H., y J. López U. 2004. La poda química en vivero incrementa la densidad de raíces en árboles jóvenes de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38: 545-553.
- Bertsch, F. 2005. Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. Instituto de la potasa y el fósforo 57: 1-10.
- Binkley, D. 1986. *Forest Nutrition Management*. J. Wiley & Sons, New York, U.S.A. 290 p.
- Cabrera, M. L., and D. E. Kissel. 1989. Review and simplification of calculations in ^{15}N tracer studies. *Fertilizer Res.* 20: 11-15.
- Cetina A., V. M., V. A. González H., M. L. Ortega D., J. J. Vargas H., y A. Villegas M. 2002. Supervivencia y crecimiento en campo de *Pinus greggii* Engelm. previamente sometido a podas o sequía en vivero. *Agrociencia* 36(2): 233-241.
- Chamshama, S. A. O., and J. B. Hall. 1987. Effects of nursery treatments on *Eucalyptus camaldulensis* field establishment and early growth at Mafiga, Morogoro, Tanzania. *For. Ecol. Manag.* 21: 91-108.
- Chang, S. X., and C. M. Preston. 2000. Understory competition affects tree growth and fate of fertilizer-applied and ^{15}N in a Coastal British Columbia plantation forest: 6 year results. *Can. J. For. Res.* 30: 1379-1388.
- Chang, S. X., C. M. Preston, K. McCullough, G. F. Weetman, and J. Barker. 1995. Effect of understory competition on distribution and recovery of ^{15}N applied to a western red cedar-western hemlock clear-cut site. *Can. J. For. Res.* 26: 313-321.
- Ehlenringer, J. R., and P. W. Rundel. 1989. Stable isotopes: history, units, and instrumentation. *In: Stable Isotopes in Ecological Research*. Rundel P. W., J. R. Ehleringer, and K. A. Nagy (eds). Springer-Verlag, New York. pp: 1-15.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 1988. Soil map of the world. Revised legend. World soil resources report 60. Rome, Italy. 138 p.
- Fife, D. N., and K. S. Nambiar. 1984. Movement of nutrients in radiata pine needles in relation to the growth of shoots. *Annals Bot.* 54: 303-314.
- Foster, N. W., E. G. Beauchamp, and C. T. Corke. 1985. Immobilization of nitrogen-15-labelled urea in a Jack pine forest floor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 448-452.
- García G., R. A. Gómez G., J. López U., J. J. Vargas H., and R. Horwath. 2004. Tree growth and $\delta^{13}\text{C}$ among population of *Pinus greggii* Engelm. at two contrasting sites in central México. *For. Ecol. and Manag.* 198: 237-247.
- Gautam, M. K., D. J. Mead, P. W. Clinon, and S. X. Chang. 2003. Biomass and morphology of pinus radiata coarse root components in a sub humid temperate silvopastoral system. *For. Ecol. Manag.* 177 (1): 387-397.
- Gómez G., A., R. F. Powers, M. J. Singer, and W. R. Horwath. 2002. N uptake and N status in ponderosa pine as affected by soil compaction and forest floor removal. *Plant and Soil* 242: 263-275.
- Hacke, U. G., J. S. Sperry, W. T. Pockman, S. D. Davis, and K. A. McCulloh. 2001. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia* 126: 457-461.
- Heilman, P. E., T. H. Dao, H. H. Cheng, S. R. Webster, and L. Christensen. 1982. Comparison of fall and spring applications of ^{15}N -labeled urea to Douglas-Fir: II. Fertilizer nitrogen recovery in trees and soil after 2 years. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1300-1304.
- Krasowski, M. J., and J. N. Owens. 2000. Morphological and physiological attributes of root systems and seedling growth in three different *Picea glauca* reforestation stock. *Can. J. For. Res.* 30: 1669-1681.
- Lieth, H. F. H. 1975. Primary production of the major vegetation units of the world. *In: Primary Productivity of the Biosphere*. Lieth, H. and R.H. Whittaker (eds). Ecological Studies 14. Springer-Verlag, New York and Berlin. pp: 203-215.
- Lindstrom, A., and G. Rune. 1999. Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil* 217: 29-37.
- McCutchan, H., and K. A. Shackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L., cv. French). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117:607-611.
- Mead, D. J., and W. L. Pritchett. 1975. Fertilizer movement in a slash pine ecosystem. II. N distribution after two growing seasons. *Plant and Soil* 43: 467-478.
- Mead, D. J. and C. M. Preston. 1994. Distribution and retranslocation of ^{15}N in lodgepole pine over eight growing seasons. *Tree Physiol.* 14: 389-402.
- Millard, P., and M. F. Proe. 1993. Nitrogen uptake, partitioning and internal cycling in *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. as influenced by nitrogen supply. *New Phytology* 125: 113-119.
- Nambiar, K. S., and G. D. Bowen. 1986. Uptake, distribution and retranslocation of nitrogen by *Pinus radiata* from ^{15}N - labelled fertilizer applied to podzolised sandy soil. *For. Ecol. Manag.* 15: 269-284.
- Nambiar, K. S., and D. N. Fife. 1991. Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiol.* 9: 185-207.
- Nõmmik, H., and K. Larsson. 1992. Effects of nitrogen source and placement on fertilizer ^{15}N enrichment in *Pinus sylvestris* foliage. *Scandinavian J. For. Res.* 7: 155-163.
- Perry, M. A., R. J. Mitchell, B. R. Zutter, G. R. Glover, and D. H. Gjerstad. 1994. Seasonal variation in competitive effect on water and pine responses. *Can. J. For. Res.* 24: 1440-1449.
- Powers, R. F., and G. T. Ferrell. 1996. Moisture, nutrient, and insect constraints on plantation growth: the "garden of eden" study. *J. For. Sci.* 26: 126-144.
- Preston, C. M., and D. J. Mead. 1994. Growth response and recovery of ^{15}N -fertilizer one and eight growing seasons after application to lodgepole pine in British Columbia. *For. Ecol. Manag.* 65: 219-229.
- Pritchett, L. W. 1986. *Suelos Forestales; Propiedades, Conservación y Mejoramiento*. Ed. LIMUSA, México. 634 p.
- SAS Institute. 1998. *SAS User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC. 595 p.
- South, D.B., and D. G. M. Donald. 2002. Effect of nursery conditioning treatments and fall fertilization on survival and early growth of *Pinus taeda* L. seedlings in Alabama, U.S.A. *Can. J. For. Res.* 32: 1171-1179.

- Staples, T. E., K. C. J. van Rees, and C. van Kessel. 1999. Nitrogen competition using ^{15}N between early successional plants and planted white spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 29: 1282-1289.
- Turner, J. 1977. Effect of nitrogen availability on N cycling in a Douglas-Fir stand. *For. Sci.* 23: 307-315.
- Vilagrosa, A., J. Bellot, V. R. Vallejo, and E. Gil-Pelegrín. 2003. Cavitation, stomatal conductance, and leaf dieback in seedlings of two co-occurring Mediterranean shrubs during an intense drought. *J. Exp. Bot.* 54: 2015-2024.
- Weinbaum, S. A., M. L. Merwin, and T. T. Muraoka. 1978. Seasonal variation in nitrate uptake efficiency and distribution of absorbed nitrogen in non-bearing prune trees. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 103(4): 516-519.
- Williams, L. E., and F. J. Araujo. 2002. Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 127(3): 448-454.