

EFFECTOS DE LA ILUMINACIÓN RELATIVA Y LA FERTILIZACIÓN SOBRE EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE ROBLE ANDINO EN VIVERO

Effects of Light Intensity and Fertilization on the Growth of Andean Oak Seedlings at Nursery

YIRA LUCIA SEPÚLVEDA¹, M.Sc.; MARÍA CLAUDIA DIEZ¹, M.Sc.; FLAVIO HUMBERTO MORENO¹, Ph. D.; JUAN DIEGO LEÓN¹, Ph. D.; NELSON WALTER OSORIO¹, Ph. D.

¹ Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Calle 59A # 63-20. ylsepulv@unal.edu.co, mcdiez@unal.edu.co, fhmoreno@unal.edu.co, jdleon@unal.edu.co, nwsosorio@unal.edu.co

Autor de correspondencia: Nelson Walter Osorio, nwsosorio@unal.edu.co

Presentado el 2 de octubre de 2013, aceptado el 31 de diciembre de 2013, fecha de reenvío el 14 de enero de 2014.

Citation / Citar este artículo como: SEPÚLVEDA YL, DIEZ MC, MORENO FH, LEÓN JD, OSORIO NW. Efectos de la iluminación relativa y la fertilización sobre el crecimiento de plántulas de roble andino en vivero. Acta Biol. Colomb. 2014. 19(2):211-220.

RESUMEN

Quercus humboldtii es una especie vegetal nativa de mucha importancia en Colombia por su uso en repoblamiento forestal y restauración de tierras altoandinas degradadas. La especie se encuentra fuertemente amenazada y es necesario establecer programas de propagación de la misma. Sin embargo, poco se conoce sobre sus exigencias nutricionales y lumínicas. El objetivo de este estudio fue determinar los efectos simples y combinados de la iluminación relativa (IR) y la fertilización sobre el crecimiento de plántulas de *Q. humboldtii* en vivero. Para esto se establecieron en combinación tres condiciones contrastantes de iluminación relativa (alta, media y baja IR) y nueve tratamientos de fertilización: completa (TC), con un elemento faltante (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S, -B) y un testigo sin fertilización (T0). La condición de IR media presentó el mejor desarrollo de las plántulas. Todos los tratamientos con deficiencias nutricionales produjeron disminuciones en el desarrollo de las plántulas con respecto a TC, excepto en el tratamiento -B. El N fue el elemento más limitante, con rendimientos similares a los del tratamiento testigo. El orden de limitación que produjeron los tratamientos aplicados siguió la secuencia: T0, -N > -Ca, -K, -P > -Mg, -S > TC, -B. No se detectó interacción significativa IR x Fertilización sobre el desarrollo de las plántulas.

Palabras clave: fertilidad del suelo, micorriza, nutrición vegetal, *Quercus humboldtii*.

ABSTRACT

Quercus humboldtii is a native plant species of great importance in Colombia for use in reforestation and restoration of degraded Andean highlands. The species is highly threatened and it is necessary to establish programs of propagation and planting. However, little is known about their nutritional and light requirements. The aim of this study was to determine the effects of single and combined relative illumination (IR) and fertilization on the growth of seedlings of *Q. humboldtii* at nursery. For this purpose three contrasting IR regimes (high, medium, and low IR) and nine fertilization treatments were established: complete (TC), a missing nutrient (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S, -B) and a control without fertilization (T0). The best development of seedlings was showed in the medium IR condition. All treatments with a lacking nutrient showed decreases in seedling development regarding TC, except in the -B treatment. Nitrogen was the most limiting nutrient yielding biomass similar to that of T0. The impact of nutrient limitation on seedling performance was in the following order: -N > -Ca, -K, -P > -Mg, -S > -B. No

significant interaction IR x Fertilization was detected on seedling development.

Keywords: mycorrhizae, plant nutrition, *Quercus humboldtii*, soil fertility.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la respuesta de las plantas a la luz y a los nutrientes, provee información acerca de su capacidad para tolerar el estrés (Palmer *et al.*, 2006; Holl *et al.*, 2011). Del adecuado conocimiento de ambos aspectos pueden derivarse recomendaciones prácticas de manejo para el desarrollo exitoso de actividades de plantación forestal, pues es necesario encontrar estrategias que mejoren la adaptación de las plántulas de las especies que se llevan a campo. Una alternativa es la producción en vivero de material vegetal de óptima calidad, que pueda adaptarse mejor a las condiciones ambientales adversas en los sitios de plantación (Patiño y Chávez, 1983).

En particular, el estudio de la demanda nutricional de las especies forestales es indispensable para enfocar actividades de fertilización más eficientes y económicamente más rentables. Es ampliamente reconocido que cada especie forestal toma diferencialmente los nutrientes del suelo y que el nivel de fertilidad edáfico limita fuertemente su crecimiento (Stanley y Montagnini, 1999; Ferrini y Alesio, 2011). Por ello, es necesaria la aplicación del conocimiento de los requerimientos nutricionales de las especies con el fin de incrementar las tasas de crecimiento radical, y en altura y biomasa de las plántulas en vivero (Herrera, 2009). Además, el manejo de la fertilización en vivero ayuda a obtener material vegetal de buena calidad que tenga mayor éxito en su trasplante, reduzca las tasas de mortalidad y mejore su adaptación al ambiente del sitio de siembra (Imo y Timmer, 1992a; Imo y Timmer, 1992b; Timmer y Aidelbaum, 1996; Salifu y Timmer, 2001).

Dada su importancia en el hemisferio norte, las especies del género *Quercus* han sido muy estudiadas, principalmente en Europa y Norteamérica (Nixon, 2006). Esta situación permite contar con experiencias para el manejo en vivero y establecimiento en campo de algunas especies del género (Batis *et al.*, 1999; Cervantes *et al.*, 2001) que podrían ser consideradas para la especie tropical *Q. humboldtii* Bonpl. (Barrios *et al.*, 2006). A pesar del proceso de especiación que dio origen al *Q. humboldtii* en los últimos miles de años y su adaptación a los suelos de la zona Andina, la información disponible sobre las otras especies del género, podría tomarse como punto de partida para la generación de tecnologías para esta especie, aunque no sean totalmente reproducibles.

Así, en cuanto a los nutrientes mayormente limitantes para el crecimiento, ensayos realizados con varias especies del género (*Q. rubra*, *Q. petrae*, *Q. robur*) han reportado como tales a N y P, y en menor medida a K (Newnham y Carlisle, 1969;

Landis *et al.*, 1989; Folk *et al.*, 1992; Imo y Timmer, 1992a, Imo y Timmer, 1992b; Salifu *et al.*, 2006). Podría entonces esperarse que *Q. humboldtii* responda con un mayor crecimiento a las aplicaciones de nutrientes, y que N y P sean los nutrientes más limitantes (Salifu y Jacobs, 2006). Otro factor ampliamente estudiado en el desarrollo inicial de las plantas de especies con algún valor económico es la luz. Para varias especies de *Quercus* del Mediterráneo se han encontrado diferencias importantes en crecimiento, desarrollo y supervivencia de plántulas debidas a variaciones en la intensidad lumínica (Sánchez *et al.*, 2006). Así, se ha reportado una mayor tolerancia a la sombra para *Q. pyrenaica* que para *Q. robur* (Sánchez *et al.*, 2006). Para el caso de robledales neotropicales en Costa Rica sin intervención antrópica se han reportado fuertes incrementos en altura de *Q. copeyensis* como respuesta al aumento de la iluminación recibida por plántulas de aproximadamente un año de edad (Sáenz, 1990). Para *Q. humboldtii* se tienen reportes que provienen de observaciones de campo, pero no de ensayos rigurosos en diferentes condiciones de iluminación. Se reporta que las plántulas y los árboles de esta especie, hasta los 5 m de altura, tienen requerimientos de iluminación relativamente altos, pero alternados con periodos de sombrero (Ideade, 1996). En estas etapas tempranas, compiten activamente con matorrales y malezas. Sin embargo, cuando el sotobosque es muy denso, las plántulas tuercen el tallo y se mantienen tortuosas o mal formadas y en algunos casos mueren por la competencia.

El estudio que aquí se presenta parte de la importancia de los factores descritos en las primeras etapas de desarrollo de las plántulas y de la necesidad de generar información de aspectos autoecológicos de *Q. humboldtii*, que soporten los diferentes programas de manejo en vivero y repoblamiento en Colombia con esta especie, hoy día amenazada en el país (Categoría Vulnerable UICN; Cárdenas y Salinas, 2006). A pesar de ello, el conocimiento sobre la ecología del roble en Colombia presenta vacíos, por lo que es necesario realizar estudios que permitan conocer más detalladamente la especie con el fin de apoyar las estrategias para su manejo y conservación (González y Parrado, 2010). El ensayo tuvo como objetivo determinar los efectos simples y combinados de la iluminación relativa (IR) y la fertilización sobre el crecimiento de plántulas de *Q. humboldtii* en vivero. Se estableció una hipótesis con respecto a aspectos de la ecología de la especie: *Q. humboldtii* al igual que otras especies de la familia Fagaceae, se desarrolla mejor en condiciones de iluminación alta, y a pesar de haber evolucionado en suelos pobres, responde a la aplicación de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El experimento se estableció en la Estación Forestal Piedras Blancas (Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín), localizada en el corregimiento de Santa Elena, municipio de

Medellín (6°15'38" N y 75°30'23" W). El lugar está a una altitud de 2400 m s. n. m., con temperatura media anual de 14,9 °C, precipitación promedio anual de 1815 mm, con régimen bimodal y humedad relativa media anual de 83 % (León *et al.*, 2011). Las condiciones bioclimáticas del área corresponden a la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB) (Holdridge, 1987).

Establecimiento del ensayo

Semillas de roble colectadas en los bosques naturales que rodean la Estación Forestal se desinfectaron mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 2 % durante cinco minutos y se lavaron con abundante agua destilada. Luego, se sembraron en arena esterilizada en autoclave (120°C, 20 min) y se regaron diariamente con agua destilada en el invernadero. Dos meses después de la siembra, las plántulas recién germinadas se trasplantaron a tubetes (10 cm diámetro x 20 cm de profundidad) con un sustrato compuesto por turba y cascarilla de arroz (1:1), donde se dejaron durante 30 días más. Esto con el fin de promover una buena formación de raíces y permitir que con el tiempo se agoten las reservas de nutrientes de las semillas. Finalmente, se seleccionaron plántulas con altura similar y con el mismo número de hojas y se trasplantaron a bolsas plásticas negras (15 cm de ancho x 30 cm de alto) que contenían 2,8 kg del sustrato utilizado para el ensayo. Este sustrato se extrajo del horizonte Bw (30-50 cm) de un Andisol de la Estación Forestal bajo cobertura de pastos (Tabla 1). El suelo se secó al aire y se tamizó con una malla de 4 mm. A cada bolsa con sustrato se le aplicaron 50 g de inóculo comercial de una mezcla de hongos formadores de micorrizas arbusculares (Glomales de Antioquia Ltda.) y 50 g de inóculo natural tomado de robledales, el cual consistió en hojarasca colectada alrededor de árboles maduros de roble para aportar al sustrato de crecimiento los hongos formadores de ectomicorrizas que requiere el roble. Después

de la siembra de las plántulas el suelo se regó con agua destilada y a lo largo del ensayo se mantuvo entre 50 y 60 % de su capacidad máxima de retención de agua.

Tratamientos

Se evaluó la combinación de tres niveles de iluminación relativa (IR) y nueve niveles de fertilización. Para evaluar el factor IR se establecieron casetas de tela de sombra (1,8 m x 1 m), con tres condiciones contrastantes de iluminación relativa (IR): alta, media y baja (Fig. 1). En el tratamiento de IR alta se dejaron las casetas a plena exposición (con la luz que penetra al vivero), en el de IR media se cubrieron las casetas con una capa de tela de sombra del 65 % (Alumitex) y en el de IR baja se cubrieron las casetas con dos capas de tela de sombra del 65 % (Alumitex). Estos tratamientos de IR alta, media y baja corresponden a 100, 30 y 15 % de iluminación relativa, medida con un sensor cuántico (LI-190, Lincoln, Nebraska, USA).

Los tratamientos de fertilización se aplicaron utilizando el método propuesto por Jenny *et al.* (1950). Se evaluaron nueve tratamientos de fertilización que incluyeron la inducción de deficiencias de macronutrientes y algunos micronutrientes considerados críticos para el desarrollo vegetal. Los tratamientos aplicados fueron: Tratamiento Completo (TC) que contenía nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y boro (B) y tratamientos con un elemento faltante, en los cuales se eliminaron del Tratamiento Completo uno a uno cada elemento, para así obtener los tratamientos -N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S, y -B. Adicionalmente, se estableció un Tratamiento Testigo (T0), sin fertilización. Las fuentes de nutrientes se aplicaron al sustrato de cada bolsa siguiendo la siguiente secuencia: inicialmente se preparó una solución de ácido fosfórico al 50 % que se adicionó con gotero al sustrato y se mezcló para garantizar una distribución uniforme. Por supuesto, esta aplicación inicial no se

Tabla 1. Características químicas y físicas del sustrato de crecimiento de las plántulas de *Q. humboldtii* durante el ensayo antes y después de la fertilización aplicada en el tratamiento completo (Horizonte Bw de un Andisol bajo cobertura de pastos, Estación Forestal Piedras Blancas).

Parámetro	Suelo testigo (T0)	Suelo tratamiento completo (TC)
pH	5,0	5,4
M.O.S. (%)	12	11,5
Al (cmol(+) kg ⁻¹)	0,2	0,18
N (g kg ⁻¹)	4,0	5,0
P (mg kg ⁻¹)	1	6
Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	1,6	5,7
K (cmol(+) kg ⁻¹)	0,21	0,35
Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	0,34	0,8
B (mg kg ⁻¹)	0,6	0,8

Métodos utilizados en los análisis: Textura: Bouyoucos (arena: 92 %, limo 4 %, arcilla 4 %). pH: Potenciométrico. Suelo: agua. 1:2. materia orgánica del suelo (M.O.S.): Walkley y Black. Volumetría. Al: Cloruro de potasio 1M. Volumetría. N: Micro- Kjeldahl. P: Bray 2. Método azul de molibdato. Espectrofotómetro UV- VIS. K, Ca, Mg: Acetato de amonio 1M. Neutro. Absorción atómica. B: Agua caliente. Azometina - H. Espectrofotómetro UV- VIS.



Invernadero																										
IR: Baja									IR: Baja									IR: Alta								
T0	TC	-B	-Ca	-P	-Mg	-N	-K	-S	T0	-B	-Ca	-K	-Mg	-N	-P	-S	TC	T0	-S	-N	-K	-Mg	-P	TC	-B	-Ca
IR: Media									IR: Alta									IR: Media								
-B	-S	-P	TC	-Mg	-K	T0	-N	-Ca	T0	TC	-Mg	-N	-P	-B	-S	-Ca	-K	T0	TC	-B	-Ca	-P	-Mg	-N	-K	-S
IR: Alta									IR: Baja									IR: Baja								
T0	TC	-B	-Ca	-P	-K	-N	-Mg	-S	T0	-S	-N	-K	-Mg	-P	TC	-B	-Ca	T0	-K	-B	-Ca	-P	-Mg	-S	TC	-N
IR: Media									IR: Alta									IR: Media								
T0	-B	-Ca	-K	-Mg	-N	-P	-S	TC	T0	TC	-Mg	-N	-P	-B	-S	-Ca	-K	-P	-Mg	-B	-N	T0	-K	TC	-S	-Ca
IR: Alta									IR: Media									IR: Baja								
-N	TC	-S	-Ca	-P	-Mg	-T0	-K	-B	T0	-S	-N	-K	-Mg	-P	TC	-B	-Ca	T0	TC	-Ca	-B	-S	-Mg	-N	-K	-P

Figura 1. Arriba: Vista del invernadero y de las casetas (parcelas grandes) para el control de la iluminación relativa (IR) dentro de este. Abajo: Esquema que muestra la ubicación de las casetas para controlar la iluminación relativa (IR) (alta, media y baja) y dentro de cada una los tratamientos de fertilización (TC = tratamiento completo, -N = tratamiento completo menos nitrógeno, -P = tratamiento completo menos fósforo, -K = tratamiento completo menos potasio, -Ca = tratamiento completo menos calcio, -Mg = tratamiento completo menos magnesio, -S = tratamiento completo menos azufre, -B = tratamiento completo menos boro, T0 = tratamiento testigo).

hizo en los tratamientos T0 y -P. Luego, se llenó cada bolsa con el sustrato, se sembraron las plántulas y se aplicaron los demás nutrientes disueltos en 200 cm³ de agua destilada, según el tratamiento correspondiente (Tabla 2). Finalmente, se adicionaron algunos microelementos (EDTA Fe, EDTA Zn, EDTA Cu cada uno aplicado a una concentración de 0,25 %, una vez por mes) como fertilizante foliar, para evitar que se presentaran deficiencias por estos elementos no evaluados, lo cual podría interferir posteriormente con los resultados. Las cantidades aplicadas fueron estimadas a partir de los resultados del análisis de suelo inicial (Tabla 1).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas; en las parcelas grandes se distribuyeron aleatoriamente los tres niveles de iluminación relativa y en las parcelas pequeñas los

nueve tratamientos de fertilización (Fig. 1). Esto correspondió a 27 tratamientos (tres de iluminación relativa (IR) por nueve de fertilización), cada uno con cinco repeticiones y cada repetición con cuatro plántulas, para un total de 540 plántulas.

Seguimiento y cosecha del ensayo

Cuatro meses después de la siembra se cosecharon las plántulas y se evaluaron los siguientes parámetros: altura (H) de las plántulas medida desde la cicatriz de los cotiledones hasta la yema más alta; diámetro del cuello de la raíz (DCR) medida con un calibrador digital de dos cifras decimales en el área de la cicatriz de los cotiledones; área foliar (AF) para lo cual se separaron las hojas (sin pecíolo) y se midieron con un medidor de área foliar (LICOR LI-3000A); biomasa seca aérea (BA) y radical (BR) previa separación y secado de las

Tabla 2. Fuentes de nutrientes y cantidades aplicadas (g/planta) al sustrato (disueltos en 200 cm³ de agua destilada, excepto el H₃PO₄), según el tratamiento de fertilización correspondiente. TC = Completo, -N = TC sin N, -P = TC sin P, -K = TC sin K, -Ca = TC sin Ca, -Mg = TC sin Mg, -S = TC sin S, -B = TC sin B, T0 = tratamiento control.

Fuente	Tratamiento (g/planta)									
	TC	-N	-P	-K	-Ca	-Mg	-S	-B	T0	
Urea	CO(NH ₂) ₂ (g)	0,17	-	0,17	0,17	0,62	-	0,17	0,17	-
Cloruro de potasio	KCl (g)	0,42	0,42	0,42	-	0,42	0,42	0,42	0,42	-
Nitrato de calcio	Ca(NO ₂) ₂ ·4H ₂ O (g)	1,75	-	1,75	1,75	-	1,75	1,75	1,75	-
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O (g)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	-	-	0,70	-
Cloruro de magnesio	MgCl ₂ ·6H ₂ O (g)	-	-	-	-	-	-	0,63	-	-
Cloruro de calcio	CaCl ₂ ·2H ₂ O (g)	-	1,09	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ ·SO ₄ (g)	-	-	-	-	-	0,38	-	-	-
Solubor	Na ₂ B ₈ O ₂₁ ·4H ₂ O (g)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄ (cm ³)	2,40	2,40	-	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	-

Tabla 3. Resultados del ANAVA del ensayo en parcelas divididas para los parámetros biométricos de las plántulas de *Q. humboldtii* en función de los factores Iluminación relativa (IR), fertilización (F) y su combinación. En el cuerpo de la tabla se presentan los valores *F* y *P*. Los asteriscos indican el nivel de significancia de las diferencias entre las medias de los tratamientos (*** = $p \leq 0,001$, ** = $p \leq 0,01$, * = $p \leq 0,05$).

Variable	Iluminación relativa (IR)	Fertilización (F)	IR x F
Altura (H)	$F_{(2,12)} = 5,09$ $P = 0,0077^{**}$	$F_{(8,67)} = 48,19$ $P = 0,000^{***}$	$F_{(16,67)} = 1,21$ $P = 0,2739$
Diámetro del Cuello de la Raíz (DCR)	$F_{(2,12)} = 19,59$ $P = 0,000^{***}$	$F_{(8,67)} = 17,62$ $P = 0,000^{***}$	$F_{(16,67)} = 0,89$ $P = 0,5847$
Biomasa Aérea (BA)	$F_{(2,12)} = 13,33$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(8,67)} = 52,96$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(16,67)} = 1,72$ $P = 0,053$
Biomasa Radical (BR)	$F_{(2,12)} = 20,14$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(8,67)} = 50,81$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(16,67)} = 1,69$ $P = 0,059$
Biomasa Total (BT)	$F_{(2,12)} = 18,60$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(8,67)} = 52,61$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(16,67)} = 1,73$ $P = 0,052$
Área Foliar (AF)	$F_{(2,12)} = 5,08$ $P = 0,0078^{**}$	$F_{(8,67)} = 51,81$ $P = 0,00^{***}$	$F_{(16,67)} = 1,36$ $P = 0,1762$

partes en una estufa a 65 °C por 72 horas. Los datos de biomasa total (BT) consistieron en la suma de ambas fracciones.

Análisis estadístico

Los datos de los parámetros biométricos obtenidos en la cosecha final se sometieron a un análisis de varianza típico para el diseño en parcelas divididas (Prueba F, $p = 0,05$). Cuando la F fue significativa se empleó la prueba de Tukey ($p = 0,05$) para comparar los efectos simples y combinados de los parámetros sobre las variables estudiadas. Para los análisis estadísticos se utilizaron los programas computacionales STATISTICA versión 6.0 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) y STATGRAPHICS CENTURION (XV.I.).

RESULTADOS

Efecto de la iluminación relativa y la fertilización sobre el desarrollo de las plántulas de *Q. humboldtii* en vivero

Los factores iluminación relativa (IR) y fertilización (F) presentaron efectos significativos sobre el desarrollo de las plántulas de *Q. humboldtii*, determinados a partir de los parámetros biométricos evaluados al momento de la cosecha (Tabla 3). Para ninguno de estos se obtuvo efecto significativo de la combinación de los factores antes mencionados.

Los parámetros H y AF se comportaron de igual manera con respecto a la iluminación relativa (IR). Se presentó una marcada diferencia en estos entre las plántulas que crecieron en IR media (de mayores valores) ($H = 46,0 \text{ cm} \pm 1,6$; $AF = 1060,2 \text{ cm}^2 \pm 68,2$) y las de IR alta (con los menores valores) ($H = 41,5 \text{ cm} \pm 1,6$; $AF = 879,6 \text{ cm}^2 \pm 68,2$) (Figs. 2A, B). H y AF de las plantas que crecieron en IR baja presentaron valores intermedios. Se observaron diferencias marcadas del parámetro DCR para los diferentes niveles de iluminación, siendo mayor en las plántulas provenientes de IR alta ($9,40 \text{ mm} \pm 0,25$), mientras que las más delgadas fueron las de IR baja ($8,11 \text{ mm} \pm 0,25$) (Fig. 2C). Las plántulas presentaron valores

Efecto de la iluminación relativa sobre los parámetros biométricos

Los parámetros H y AF se comportaron de igual manera con respecto a la iluminación relativa (IR). Se presentó una marcada diferencia en estos entre las plántulas que crecieron en IR media (de mayores valores) ($H = 46,0 \text{ cm} \pm 1,6$; $AF = 1060,2 \text{ cm}^2 \pm 68,2$) y las de IR alta (con los menores valores) ($H = 41,5 \text{ cm} \pm 1,6$; $AF = 879,6 \text{ cm}^2 \pm 68,2$) (Figs. 2A, B). H y AF de las plantas que crecieron en IR baja presentaron valores intermedios. Se observaron diferencias marcadas del parámetro DCR para los diferentes niveles de iluminación, siendo mayor en las plántulas provenientes de IR alta ($9,40 \text{ mm} \pm 0,25$), mientras que las más delgadas fueron las de IR baja ($8,11 \text{ mm} \pm 0,25$) (Fig. 2C). Las plántulas presentaron valores

significativamente menores de BA, BR y BT en condición de IR baja; para las IR media y alta, estos parámetros no mostraron diferencias significativas entre sí (Fig. 2D, E, F). Así, la mayor biomasa total se obtuvo con los tratamientos de IR media y alta ($31,1 \text{ g} \pm 1,5$) que con el del tratamiento IR baja ($24,02 \text{ g} \pm 1,5$). El índice BA/BR promedio fue de 0,50 para el tratamiento IR alta, 0,52 para IR media y 0,47 para IR baja. La menor área foliar específica se registró en las plántulas provenientes del tratamiento IR alta ($136,9 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$), seguidas por IR media ($162,1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) e IR baja ($193,8 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$).

Efecto de la fertilización sobre los parámetros biométricos
 Los parámetros AF y BA mostraron las diferencias más notorias entre los tratamientos de fertilización aplicados (Figs. 3 A, B); para BR y BT también se presentaron separaciones entre los diferentes tratamientos, aunque menos claras en los efectos intermedios (Figs. 3E, F). En términos generales, para DCR y H no hubo una separación tan clara entre los tratamientos aplicados, pero se detectó una tendencia similar en el efecto de la fertilización sobre ambos parámetros (Figs. 3A, C).

El N se presentó como el elemento más limitante para el desarrollo de las plantas. En el tratamiento -N se registraron los menores valores en todos los parámetros evaluados con respecto al tratamiento TC (AF = 21 %, BA = 21 %, BR = 39 %, BT = 32 %, DCR = 70 % y H = 47 %), de hecho no fueron estadísticamente diferentes T0 (testigo) y -N en estas varia-

bles (Fig. 3). Las parámetros biométricos obtenidos con los tratamientos -Ca, -K y -P alcanzaron valores inferiores con respecto al tratamiento TC. De esta manera los valores medios fueron AF = 53 %, BA = 48 %, BR = 62 %, BT = 57 %, DCR = 83 % y H = 72 %, respectivamente. Un menor efecto tuvo sobre los parámetros biométricos considerados, la falta de suministro de Mg y S; así, los valores promedios de rendimiento con respecto al TC, en ausencia de Mg y S, fueron: AF = 88 %, BA = 71 %, BR = 77 %, BT = 75 %, DCR = 87 % y H = 89 %. A diferencia de los restantes elementos evaluados, con las plántulas del tratamiento -B no hubo diferencias significativas con el tratamiento TC (AF = 104 %, BA = 102 %, BR = 101 %, BT = 101 %, DCR = 99 % y H = 103 %) (Fig. 3).

DISCUSIÓN

A diferencia de los resultados de otros estudios, las combinaciones entre la iluminación relativa y la fertilización evaluadas, no incidieron significativamente en el crecimiento y desarrollo de las plántulas de *Q. humboldtii*. Así, Minotta y Pinzauti (1996) encontraron efectos combinados de la iluminación y la fertilidad del suelo sobre el desarrollo de plántulas de *Fagus sylvatica*. Dicha diferencia puede deberse a que dicho estudio se centró en dos calidades de sustrato de crecimiento, mientras que en nuestro caso analizamos uno a uno los elementos de interés. Para los diferentes niveles de iluminación, el hecho de haberse encontrado mayores va-

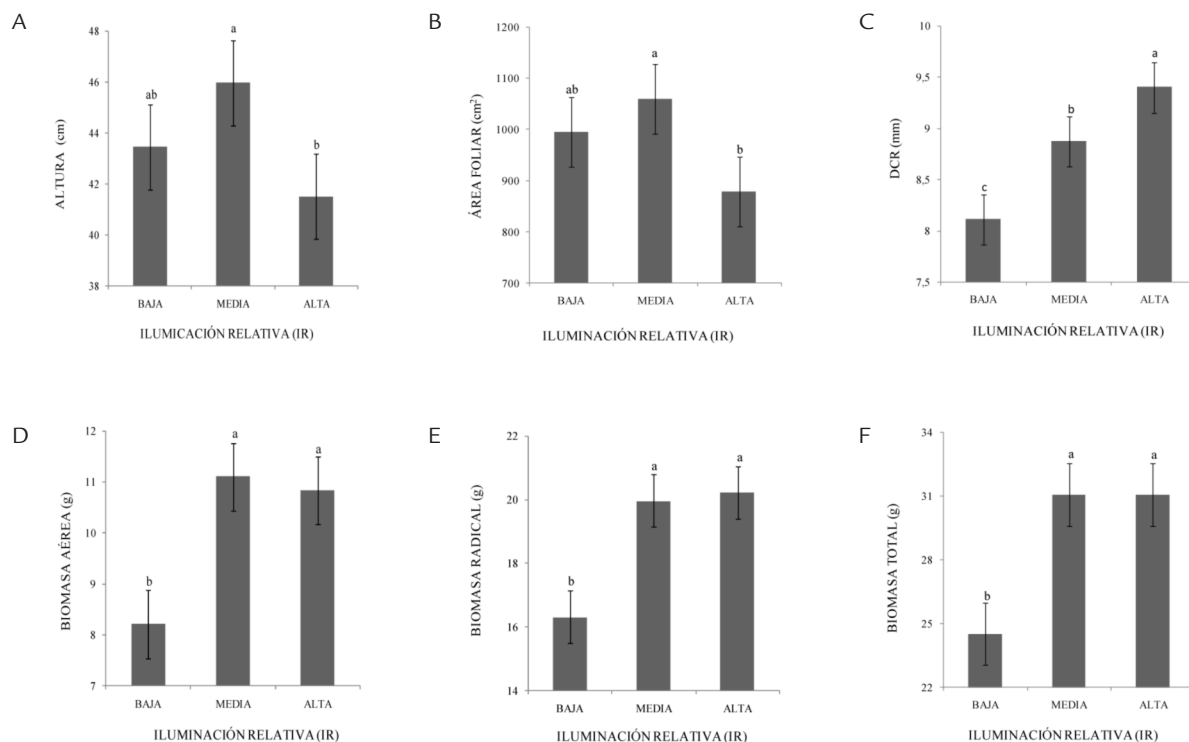


Figura 2. Intervalos de confianza de Tukey ($p = 0,05$) para los parámetros biométricos de plántulas de *Q. humboldtii* evaluados al final del ensayo en condición de vivero con iluminación relativa (IR) alta, media y baja. A. Altura (cm), B. Área Foliar (cm²), C. Diámetro del Cuello de la Raíz (DCR) (mm), D. Biomasa Aérea (g), E. Biomasa Radical (g), F. Biomasa Total (g).

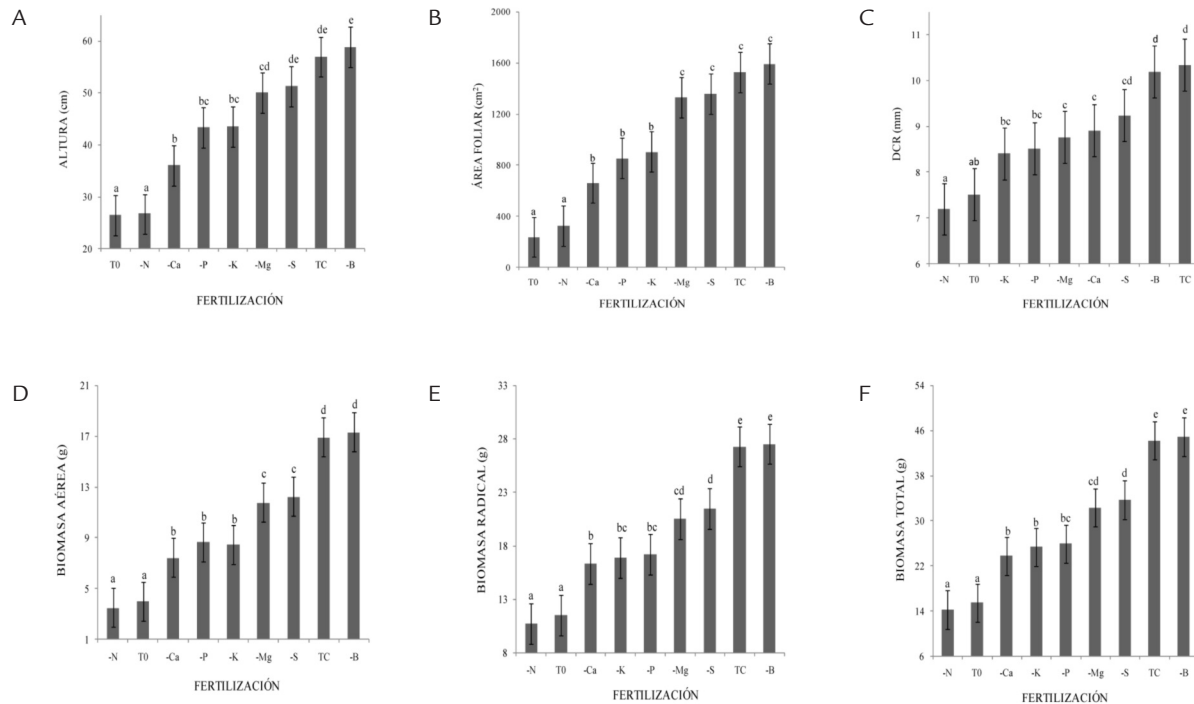


Figura 3. Efecto de la fertilización sobre los parámetros biométricos de plántulas de *Q. humboldtii* evaluadas al final del ensayo. A. Altura (cm), B. Área foliar (cm²), C. Diámetro del cuello (mm), D. Biomasa aérea (g), E. Biomasa radical (g), F. Biomasa total (g).

lores del parámetro DCR en condiciones de IR alta, indica que al disminuir la iluminación, las plántulas de roble elongan el tallo, haciéndose más delgadas, y aumentan el área foliar para captar más luz. De hecho, con la menor iluminación, IR baja, determinó se detectaron valores significativamente menores para los parámetros BA, BR y BT con respecto a la IR media y alta. Por otro lado, la menor área foliar específica determinada para las plántulas del tratamiento IR alta, fue resultado de que a pesar de la menor área foliar de las plántulas en este tratamiento.

En general, se observaron diferencias estructurales (mayores valores de altura y área foliar) en las plántulas sometidas al tratamiento de iluminación media, lo cual podría indicar la existencia de un cierto grado de tolerancia a la sombra. Estos resultados difieren de los obtenidos para otras especies del género *Quercus* (*Q. copeyensis*, *Q. robur*), que obtienen su mejor desarrollo a plena exposición (Sáenz, 1990; Valladares *et al.*, 2002). Así puede sugerirse que el mejor desarrollo de plántulas de *Q. humboldtii* ocurre en condiciones de iluminación relativa cercanas al 30 %, comparables a las condiciones de los rastrojos bajos y de las plantaciones de roble en sus etapas iniciales.

Los tratamientos de fertilización aplicados a las plántulas de roble pueden separarse, de manera general, en cuatro grupos según su grado de limitación en el desarrollo: T0 y -N > -Ca, -K y -P > -Mg y -S > TC y -B. Así, la falta de suministro de N generó las mayores limitaciones para el crecimiento de las plántulas. Esto tiene implicaciones importantes para el ma-

nejo en vivero, ya que se debe aplicar a las plántulas una fertilización nitrogenada adecuada, pues este elemento es el que más limita el normal desarrollo vegetal en esta etapa. La deficiencia de N es uno de los factores más limitantes para las plantas en general, los resultados mostrados confirman dicha afirmación. Se ha reportado que la deficiencia de N ha limitado el desarrollo de otras especies forestales tales como: *Acacia mangium* y *Platycamus regnelli* (Braga *et al.*, 1995); *Cedrela fissillis*, *Piptadenia gonoacantha*, *Caesalpinia ferrea* y *Senna multijuga* (Renó *et al.*, 1993), *Swietenia macrophylla* (Duboc *et al.*, 1994; Wallau *et al.*, 2008), *Acacia holosericea* (Sarcinelli *et al.*, 2004). Para otras especies de *Quercus* también se ha reportado que la falta de N limita altamente su desarrollo (Newnham y Carlisle, 1969; Landis *et al.*, 1989; Folk *et al.*, 1992; Imo y Timmer, 1992a; Imo y Timmer, 1992b; Salifu *et al.*, 2006).

La diferencia entre los contenidos de N en los suelos utilizados en este ensayo con tratamientos T0 (N = 0,4 %) y TC (N = 0,5 %), indican que un aumento en la concentración inicial en 0,1 % es suficiente para generar incrementos importantes en el desarrollo de las plántulas de *Q. humboldtii*. Así, un contenido de N = 0,4 % en los suelos derivados de ceniza volcánica se podría considerar como un nivel muy bajo para el desarrollo de las plántulas de esta especie en vivero, mientras que un nivel de N = 0,5 % es más conveniente, sin afirmar que sea el óptimo.

Aunque la falta de suministro de Ca, K y P limitó el crecimiento de las plántulas, no fue tan determinante como la de N. Los elementos Ca y K se han reportado como limitantes

para el desarrollo de *Swietenia macrophylla* (Wallau *et al.*, 2008). Para *Acacia holosericea* K fue medianamente limitante pero el Ca no (Sarcinelli *et al.*, 2004). Es ampliamente reportado que P es uno de los nutrientes que más limita el crecimiento vegetal, principalmente en suelos derivados de ceniza volcánica como el usado en este estudio. Sin embargo, es posible que la aplicación aquí realizada de inóculos micorrízicos al momento de la siembra, permitiera que la asociación hongo-planta mejorara la absorción del P presente en el sustrato y redujera el grado de limitación. En suelos con bajos contenidos de nutrientes ha sido obtenido también este resultado con especies forestales como *Swietenia macrophylla* (Wallau *et al.*, 2008) y *Acacia holosericea* (Sarcinelli *et al.*, 2004). Al comparar las concentraciones de K, Ca y P entre el suelo fertilizado (TC) y el suelo testigo (T0), las del TC fueron superiores para estos tres elementos y equivalentes a 1,7, 3,6 y 6,0 veces las de T0, respectivamente (Tabla 1). Lo anterior indica la necesidad de aplicar al suelo cantidades relativamente altas de K, Ca y P para que alcance estos niveles y se logre un buen desarrollo de las plántulas de roble en suelos derivados de ceniza volcánica.

Mg y S fueron elementos que presentaron menor grado de limitación, ya que aunque su ausencia redujo el desarrollo de las plántulas, esta disminución no fue tan grande como la obtenida ante la ausencia de N, Ca, K y P. Ambos elementos fueron poco limitantes para el desarrollo de *Hymenaea courbaril* (Duboc *et al.*, 1994). Para *Acacia holosericea* la deficiencia de S también presentó poco efecto sobre su desarrollo, mientras el Mg sí fue más limitante (Sarcinelli *et al.*, 2004). En el presente estudio la deficiencia de Mg también fue un factor limitante para el crecimiento de las plántulas de roble, la concentración de Mg en el suelo del tratamiento TC ($0.8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) fue más del doble de la encontrada en el tratamiento T0 ($0,34 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), correspondientemente la biomasa fue 44,25 y 32,34 g/planta (-Mg tuvo 27 % menos biomasa total).

Un resultado relevante de este estudio es el comportamiento de las plántulas con el tratamiento de fertilización -B, ya que el desarrollo de las plántulas fue similar al de las del tratamiento TC. Esto puede indicar que el contenido que inicialmente poseía la semilla y/o el suelo ($0,6 \text{ mg kg}^{-1}$) (Tabla 1) fue suficiente para suplir las necesidades de B en esta etapa del crecimiento. Valores de suficiencia comparables ($0,5\text{-}1,0 \text{ mg kg}^{-1}$) han sido reportados para otras especies vegetales de interés agronómico (p.e., café, aguacate, coliflor, entre otras) con el método del agua caliente (Osorio, 2012). Para *Hymenaea courbaril* se encontró que el B no fue limitante del desarrollo y su mayor aplicación generó menor crecimiento por toxicidad (Duboc *et al.*, 1994).

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio mostraron que los efectos simples tanto de la disponibilidad de luz como de nutrientes afectan las tasas de crecimiento y desarrollo de plantas jóvenes

de la especie *Q. humboldtii*. Su mejor desempeño se obtuvo en condiciones de iluminación relativa media, situación contraria a la esperada, pues en otras especies del género en zonas templadas y subtropicales, se obtuvieron mejores resultados en condiciones de iluminación alta, lo cual indica una menor demanda de iluminación. Bajo las condiciones de suelo estudiadas, el N fue el elemento más limitante, seguido de Ca, K y P y en menor grado Mg y S, mientras que B no fue limitante. De aquí que, para la realización de actividades en vivero y de repoblamiento con la especie, deben suministrarse estos nutrientes en las fórmulas de fertilización y atender el grado de tolerancia a la sombra que la especie muestra, la cual fue menor bajo condiciones de iluminación relativa inferior al 30 %. Esto podría lograrse en campo si los árboles se plantan bajo coberturas vegetales que ofrezcan un grado de iluminación cercano al caso de rastrojos bajos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó como parte de las actividades del proyecto: "Ecología y Silvicultura del roble de tierra fría (*Quercus humboldtii* Bonpl.)" cofinanciado por la Corporación Autónoma Regional para el Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA y la Universidad Nacional de Colombia. Agradecimiento a la Maestría en Bosques y Conservación Ambiental, al Laboratorio de Ecología César Pérez Figueroa y a la Estación Forestal Piedras Blancas. Igualmente, agradecemos a D. Restrepo y P. Restrepo por su participación en el establecimiento, seguimiento y cosecha de las plántulas. Agradecemos a los revisores anónimos del manuscrito sus aportes enriquecieron el documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias LA. El relieve de la zona central de Antioquia. Rev Fac Ing Univ Ant. 1995;10:9-24.
- Barrios D, Vargas W, Lozano F, Palacio JD. Evaluación genética de los bosques de roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.) en los municipios de Filandia y Salento, Quindío, utilizando la técnica de microsatélites. En: Solano C, Vargas N, editores. Memorias del I Simposio Internacional de Robles y Ecosistemas Asociados. Bogotá: Fundación Natura-Pontificia Universidad Javeriana; 2006. p. 29-47.
- Batis A, Alcocer M, Gual M, Sánchez C, Vázquez C. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. México: Instituto de Ecología UNAM - Conabio; 1999. p. 25-28.
- Braga F de A, Vale FR, Ventorim N, Aubert E, Lopes G de A. Requerimentos nutricionais de quatro espécies florestais. Rev Árvore. 1995;19(1):18-31.
- Cárdenas D, Salinas NR, editores. Libro rojo de plantas de Colombia: Especies maderables amenazadas. Bogotá: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2006. p. 15-20.
- Cervantes V, López M, Salas N, Hernández G. Técnicas para

- propagar especies nativas de la selva baja caducifolia y criterios para establecer áreas de reforestación. México D.F.: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México; 2001, p. 17.
- Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia (CORANTIOQUIA). Conservación, ordenamiento y manejo del sistema de páramo y bosques altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño. Medellín: Corantioquia; 1999, p. 7.
- Duboc E, Venterim N, Vale FR, Davide AC. Nutrição do Jatobá (*Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang.). Parte da Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal da primeira autora apresentada a Universidad Federal de Lavras. Lavras: UFLA; 1994. p. 50.
- Ferrini F, Alesio A. Sustainable management techniques for trees in the urban areas. *J Biol and Ecol Sciences*. 2011;1(1):1-20.
- Folk RS, Timmer VR, Scarratt JB. Evaluating peat as a growing medium for jack pine seedlings. I. Conventional laboratory indices. *Can For Res*. 1992;22(7):945-949.
- González A, Parrado A. Diferencias en la producción de frutos del roble *Quercus humboldtii* Bonpl. en dos bosques andinos de la cordillera oriental colombiana. *Colomb For*. 2010;13(1):141-162.
- Herrera S. Árboles de la Universidad del Valle. Santiago de Cali: Programa editorial Universidad del Valle; 2009. p. 21.
- Holdridge LR. Ecología basada en zonas de vida. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; 1987. p. 32.
- Holl KD, Zahawi RA, Cole RJ, Ostertag R, Cordell S. Planting seedlings in tree islands versus plantations as a large-scale tropical forest restoration strategy. *Restor Ecol*. 2011;19(4):470-479.
- Imo M, Timmer VR. Growth, nutrient allocation and water relations of mesquite (*Prosopis chilensis*) seedlings at differing fertilization schedules. *For Ecol Manag*. 1992a;55(1-4):279-294.
- Imo M, Timmer VR. Nitrogen uptake of mesquite seedlings at conventional and exponential fertilization schedules. *Soil Sci Soc Am J*. 1992b;56(3):927-943.
- Instituto de Estudios Ambientales para el Desarrollo - IDEADE. Evaluación del status ecosistémico y de manejo de bosques de Fagaceas (*Quercus humboldtii* y *Trigonobalanus excelsum*) en el norte de la cordillera oriental (Cundinamarca, Santander y Boyacá). Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana; 1996. p. 43.
- Jenny H, Vlamis J, Martin WE. Greenhouse assay of fertility of California soils. *Hilgardia*. 1950;20:1-18.
- Nixon KC. Global and neotropical distribution and diversity of oak (genus *Quercus*) and oak forests. *Ecological Studies* 2006;185:3-13.
- Landis TD, Timus RW, McDonald SE, Barnett JP. Seedling nutrition and irrigation. The container tree nursery manual. Agricultural Handbook 674. Washington, D.C.: USDA Forest Service; 1989. p. 53.
- Minotta G, Pinzauti S. Effects of light and soil fertility on growth, leaf chlorophyll content and nutrient use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *For Ecol Manag*. 1996;8681-3:61-71.
- Newnham RM, Carlisle A. The nitrogen and phosphorus nutrition of seedlings of *Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl. *J Ecol*. 1969;57(1):271-284.
- Osorio NW. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 200-204.
- Palmer MA, Falk DA, Zedler JB. Ecological theory and restoration ecology. En: Falk DA, Palmer MA, Zedler JB, editors. *Foundations of Restoration Ecology*. Washington: Island Press; 2006. p. 1-10.
- Patiño F, Chavez J. Viveros forestales. Establecimiento y producción de plantas. Instituto de investigaciones forestales y agropecuarias. Mérida: Centro de Investigación Regional del Sureste; 1983. p. 23-27.
- Renó NB, Vale FR, Curi N, Siqueira JO. Requerimentos nutricionais de quatro espécies florestais nativas. Resumos Congresso Brasileiro de Ciência do solo 24. Goiânia: SBCS; 1993. p. 57.
- Sáenz G. Densidad y dinámica de plántulas de *Quercus copeyensis* bajo dosel y en apertura, en el primer año después de la germinación en los robledales de Villa Mills, Costa Rica. [Tesis de maestría]. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza; 1990. p. 62.
- Salifu KF, Jacobs DF. Characterizing fertility targets and multi-element interactions in nursery culture of *Quercus rubra* seedlings. *Ann For Sci*. 2006;63(3):231-237.
- Salifu KF, Timmer VR. Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Sci Soc Am J*. 2001;65:905-913.
- Salifu KF, Nicodemus MA, Jacobs DF, Davis AS. Evaluating chemical indices of growing media for nursery production of *Quercus rubra* seedlings. *Hortscience* 2006;41(5):1342-1346.
- Sánchez D, Valladares F, Zavala MA. Functional traits and plasticity in response to light in seedlings of four Iberian forest tree species. *Tree Physiol*. 2006a;26(11):1425-1433.
- Sánchez D, Zavala MA, Valladares F. Survival responses to irradiance are differentially influenced by drought in seedlings of forest tree species of the temperate-Mediterranean transition zone. *Acta Oecol*. 2006b;30(3):322-332.
- Sarcinelli TS, Ribeiro ES, Dias LE, Lynch LS. Sintomas de deficiência nutricional em mudas de *Acacia holosericea* em resposta à omissão de macronutrientes. *Rev Árvore*. 2004;25(2):173-181.
- Stanley WG, Montagnini F. Biomass and nutrient accumulation in pure and mixed plantations of indigenous tree species grown on poor soils in the humid tropics of Costa Rica. *For Ecol Manag*. 1999;113(1):91-103.

- Timmer VR, Aidelbaum A. Manual for exponential nutrient loading of seedlings to improve transplanting performance on competitive forest sites. NODA/NFP Tech. Rep. TR25. Ontario: Canadian Forest Services; 1996. p. 56 p.
- Valladares F, Chico J, Aranda I, Balaguer L, Dizengremel P, Manrique E, Dreyer E. The greater seedling high-light tolerance of *Quercus robur* over *Fagus sylvatica* is linked to a greater physiological plasticity. *Trees*. 2002; 16(6):395-403.
- Wallau RLR, Borges AR, Rezende D, Camargos SL. Sintomas de deficiências nutricionais em mudas de mogno em solução nutritiva. *Cerne, Lavras*. 2008;14(4):304-310.