



Efecto de la fertilización en el crecimiento de *Retrophyllum rospigliosii* de la zona andina colombiana

Fertilization effect on the growth of *Retrophyllum rospigliosii* of the Andean zone of Colombia

Jorge Andrés Ramírez^{1*}, Adriana Marín², John Byron Urrego², Álvaro Castaño³ y Román Ospina¹

¹ Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agrarias. Popayán, Colombia.
rospina@unicauca.edu.co

² Smurfit Kappa Colombia. Departamento de Investigación Forestal. Puerto Isaacs, Cali, Colombia; adriana.marin@smurfitkappa.com.co, john.urrego@smurfitkappa.com.co

³ Smurfit Kappa Colombia. Departamento de Planeación Forestal. Puerto Isaacs, Cali, Colombia. alvaro.castano@smurfitkappa.com.co

* Autor de correspondencia. jramirez@unicauca.edu.co

RESUMEN

Retrophyllum rospigliosii es una especie amenazada nativa de los bosques altoandinos. Con el fin de evaluar si la fertilización química incrementa el crecimiento (diámetro, altura, área basal y volumen) de *R. rospigliosii*, se estableció en 1999 una plantación de esta especie en la zona andina colombiana. A partir del monitoreo de la plantación (años 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2016 y 2018), se realizó un análisis longitudinal mediante un modelo lineal mixto para evaluar el efecto de los tratamientos de fertilización en el crecimiento. Las tasas de crecimiento promedio encontradas en esta plantación fueron ligeramente superiores a las anteriormente registradas para esta especie, con un incremento medio anual del diámetro, altura, área basal y volumen para el testigo de 12 mm, 0.661 m, 2.050 m² ha⁻¹ y 0.012 m³, respectivamente, pero más lentas en comparación con otras especies de coníferas comúnmente plantadas en la zona andina colombiana. El tratamiento de fertilización No. 6 (50 kg ha⁻¹ de N, 20 kg ha⁻¹ de P, 2 kg ha⁻¹ de B y 5.5 kg ha⁻¹ de elementos menores) conllevó un incremento significativo en las variables evaluadas respecto al testigo (9.2%, 8.4%, 18.4% y 25.0%, respectivamente para diámetro, altura, área basal y volumen) durante el período de estudio considerado. Ello posiblemente debido a que la fertilización temprana favorece un pronto cierre de copas y la reducción de malezas, lo cual, sumado a las adaptaciones de la especie a la baja disponibilidad de nutrientes del suelo, mantiene el efecto a lo largo del tiempo.

PALABRAS CLAVE: bosques montanos tropicales, crecimiento arbóreo, fertilización química, pino colombiano, reforestación con especies nativas.

ABSTRACT

Retrophyllum rospigliosii (Podocarpaceae) is a native conifer species of high Andean forests that is currently under endangered status. To evaluate if the fertilization of the soil improves the yield of *R. rospigliosii* stands, a plantation of this species was established in the Colombian Andean zone in 1999 and monitored over time (years: 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2016 and 2018). A longitudinal analysis was performed using a linear mixed model to evaluate the effect of fertilization treatments on growth of *R. rospigliosii*. Average growth rates found in this plantation were slightly higher than those reported for this species, but slower compared to other coniferous species commonly planted in the Colombian Andean zone. The average annual increment in diameter, height, basal area, and volume in the control treatment was 12 mm, 0.661 m, 2.050 m² ha⁻¹ and 0.012 m³, respectively. The fertilization treatment number 6 (50 kg ha⁻¹ of N, 20 kg ha⁻¹ of P, 2 kg ha⁻¹ of B and 5.5 kg ha⁻¹ of trace elements) showed a significant increase in the growth variables evaluated relative to the control (9.2%, 8.4%, 18.4% and 25.0%, respectively for diameter, height, basal area, and volume) during the study period. This is possibly because early fertilization favors early crown closure and weed reduction, which, added to the adaptations of this species to low soil nutrient availability, maintains the effect over time.

KEYWORDS: montane tropical forests, tree growth, chemical fertilization, Colombian pine, reforestation with native species.

INTRODUCCIÓN

Las podocarpaceas están entre las pocas familias de gimnospermas que persisten naturalmente en los bosques tropicales andinos (Dalling, Barkan, Bellingham, Healey y Tanner, 2011; Mill, 2016; Turner y Cernusak, 2011). Particularmente, la especie *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page se encuentra distribuida en Bolivia, Ecuador, Perú, Venezuela y Colombia, en un intervalo altitudinal que va desde los 1500 m hasta los 3750 m s.n.m. (Cernusak, Adie, Bellingham, Biffin y Brodribb, 2011; Turner y Cernusak, 2011), donde forman rodales puros o bosques dominados por árboles de esta especie junto con diversos taxones de las familias Rubiaceae, Lauraceae, Myrtaceae y Melastomataceae (Marín, 1998).

En Colombia, los procesos de deforestación en los bosques altoandinos para la conversión del suelo a usos agrícolas y pecuarios han conducido a la reducción de las áreas donde habita *R. rospigliosii* (Armenteras, Gast y Villareal, 2003; Armenteras, Rodríguez, Retana y Morales, 2011; González *et al.*, 2018). Adicionalmente, esta especie ha sido intensamente explotada debido a las características físico mecánicas de su madera (Arostegui y Sato, 1970; Vásquez-Correa y Alcántara-Vara, 2009), lo cual ha ocasionado una progresiva disminución de sus poblaciones en los últimos años. Por ambas razones esta especie se encuentra amenazada y, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) está catalogada como casi amenazada a vulnerable (Cogollo, Velásquez-Rúa, Toro y García, 2007; Gardner y Thomas, 2013).

Con el fin de prolongar la permanencia de *R. rospigliosii* en los bosques, se hace pertinente el desarrollo de programas de restauración y reforestación que incluyan dicha especie (Diez, Osorio y Moreno, 2008). No obstante, el desarrollo de dichos programas ha sido casi nulo debido al desconocimiento de las prácticas silviculturales que maximizan la sobrevivencia y crecimiento de la especie (Cueva, Velez, Barrios y Nieto, 2013). Adicionalmente, la especie presenta un crecimiento lento, inferior al observado para diferentes especies introducidas en la zona andina

como *Pinus patula* Schltdl. & Cham., *Cupressus lusitanica* Mill, o la especie nativa *Alnus acuminata* Kunth (Brodribb, 2011; Cavelier y Tobler, 1998; Diez *et al.*, 2008). Ello, posiblemente se debe a los suelos de baja fertilidad, característicos de la zona andina colombiana (Jaramillo, 2002), donde se presenta habitualmente baja capacidad de intercambio catiónico, alta acidez, presencia de procesos erosivos severos y poca profundidad efectiva (Consultorias & Estrategias de Producción Agroecológica y Cafetera [Coesagro], 2004; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2009).

Se considera que una adecuada fertilización del suelo podría ser una opción para mejorar el rendimiento de los rodales establecidos de *R. rospigliosii* (Diez *et al.*, 2008). Ello dado que la fertilización estimula el desarrollo radical, optimiza el uso eficiente del agua y mejora la eficacia en la captación de nutrientes por las plantas (Alvarado y Raigosa, 2012; Binkley, 1993; Espinosa, Acuña, García, Rodríguez y Rubilar, 2017). Adicionalmente, la fertilización adecuada en plantaciones facilita un rápido crecimiento inicial y el cierre de las copas, lo cual disminuye la competencia con otras plantas y mejora el rendimiento final de la plantación (García, Sotomayor, Silva y Valdebenito, 2000). Por ejemplo, experimentos de fertilización con pinos en zonas tropicales muestran que el incremento medio anual puede aumentar entre 1 m³ ha⁻¹ y 8 m³ ha⁻¹, especialmente en los sitios con baja fertilidad (Alvarado, 2015).

Por ello, es relevante conocer la respuesta de *R. rospigliosii* a la fertilización bajo diferentes esquemas nutricionales, lo cual podría señalar a futuro prácticas estándar para el establecimiento y manejo de rodales de dicha especie.

OBJETIVOS

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el crecimiento de pino colombiano (*R. rospigliosii*) bajo diferentes tratamientos de fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio, boro y elementos menores en una plantación durante 20 años de crecimiento.



MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza al occidente del departamento del Cauca (municipio de El Tambo), Colombia. El sitio se encuentra entre las coordenadas 2° 28' 0" y 2° 29' 40" N; y 76° 48' 30" y 76° 50' 0" W (Fig. 1), a una altitud de 1755 m s.n.m. Según los datos de la estación meteorológica del lugar (perteneciente a Smurfit-Kappa Carton de Colombia), la precipitación media anual es de 2255 mm, con régimen de distribución unimodal, con menor precipitación entre los meses de junio y septiembre. La temperatura promedio anual es de 19 °C (Fig. 1). Los suelos en el área de estudio

están formados principalmente por cenizas volcánicas, con un desarrollo pedogenético que se puede considerar alto, manifestado por el desarrollo de varios horizontes Bw y por la formación de un horizonte Ap de grosor variable con altos contenidos de materia orgánica. Estudios llevados a cabo en el sitio indican que estos suelos se caracterizan por tener texturas franco-arenosas a franco-limosas, con capacidad de intercambio de cationes de altas a muy altas y con contenidos de materia orgánica alrededor de 25%. La fertilidad del suelo es muy baja con reducidas concentraciones de fósforo, contenidos muy altos de aluminio cambiante y pH muy fuertemente ácidos del orden de 4.1 (Tabla 1; Coesagro, 2004).

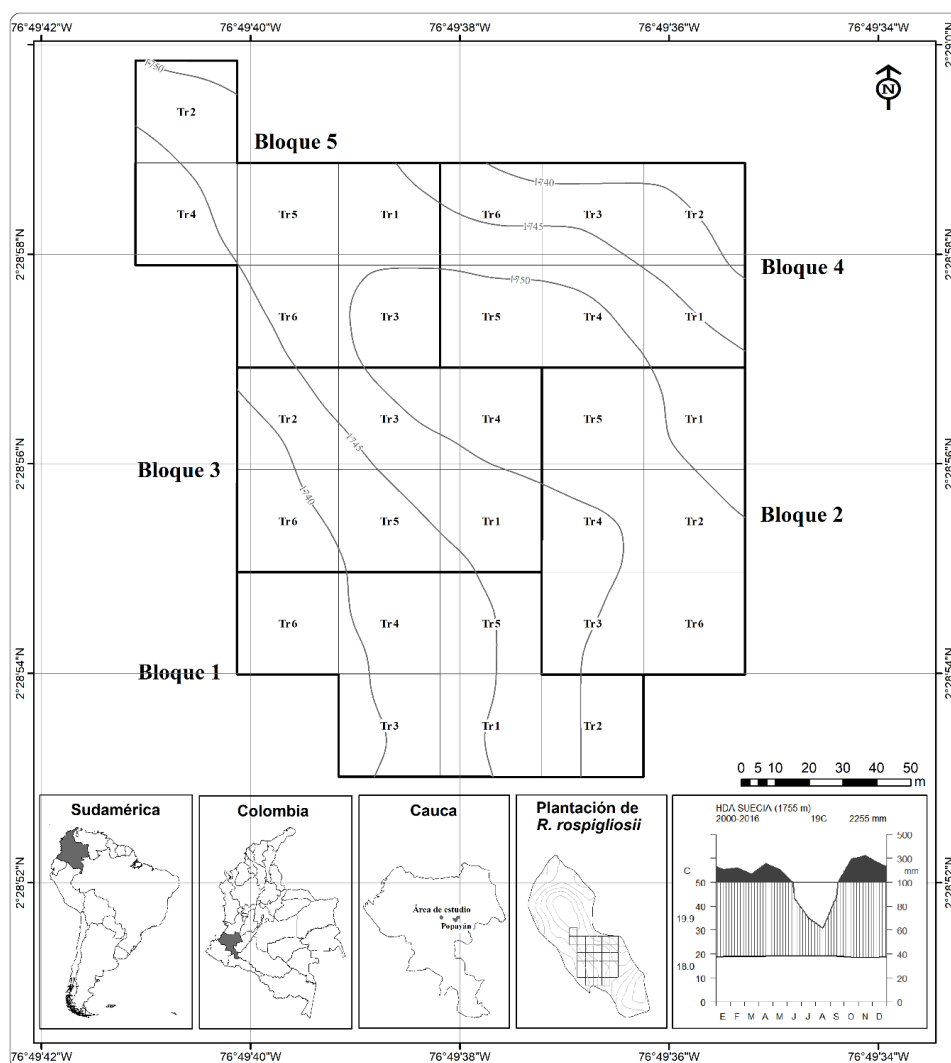


FIGURA 1. Diseño del experimento, localización del área de estudio y climadiagrama del área de estudio.

TABLA 1. Características químicas del suelo en el sitio estudiado antes de los tratamientos de fertilización

Determinación	Unidades	Horizontes			
		Ap	Bw ₁	Bw ₂	C
		0 - 50	50 - 100	100 - 150	150 - 200
Profundidad (cm)					
pH	H ₂ O	4.1	5.3	5.6	5.9
	KCl	3.8	4.9	5	5
N	%	0.76	0.24	0.08	0.05
Mat. Orgánica		24.9	5.5	1.4	0.8
P	ppm	2	3	2	3
K		0.19	0.12	0.24	0.27
Ca		0.1	0.3	0.4	0.2
Mg		0.2	0.5	0.2	0.1
Na	Cmol ⁺ kg ⁻¹	0.25	0.09	0.08	0.07
Al		5.4	0.2	0.1	0.2
CIC		46	30	31	27
CICE		6	1	1	1
Fe		299	253	248	283
Mn		43	1	0	0
Zn		6	1	0	0
Cu	mg kg ⁻¹	3	1	1	1
B		0	0.2	0.2	0.1
S		1.6	3.4	18.4	2.8

CIC: Capacidad de intercambio catiónico, CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva.

Métodos de campo

En 1999, mediante un convenio entre el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y Smurfit Kappa Colombia, se estableció una plantación de *R. rospigliosii* de 6.57 hectáreas a una densidad de 1111 árboles por hectárea (correspondiente a un espaciamiento de 3 m × 3 m). El material genético utilizado en el establecimiento de la plantación provino de semillas recolectadas de árboles establecidos en un bosque natural al suroeste del departamento de Antioquia (municipio de Támesis, Colombia) en la finca La Playa, donde las condiciones

ambientales y de suelo son similares a las presentadas en el área de estudio. Dentro de la plantación se establecieron 30 parcelas permanentes, cada una de 100 árboles (10 × 10 árboles). Con el fin de disminuir el efecto de borde, los tratamientos se aplicaron en los 16 árboles centrales de cada parcela.

Para evaluar el efecto de la fertilización en el crecimiento de la especie, se determinó un arreglo con cinco repeticiones (bloques al azar), cinco tratamientos y un testigo (tratamientos No. 1-6). La aplicación del fertilizante (tratamientos) se realizó en el primer y cuarto años de la



plantación a diferentes concentraciones de nutrientes (Tabla 2), ello siguiendo las normas técnicas establecidas por la División Forestal de Smurfit Cartón de Colombia para plantaciones de coníferas (documento privado, Smurfit Cartón de Colombia 1994). El fertilizante se aplicó ambas veces durante la época de lluvias en el segundo semestre del año (octubre a diciembre). Para aplicar el fertilizante se abrieron tres huecos de 10 cm de profundidad a 15 cm de la plántula formando un triángulo alrededor de la misma, los cuales posteriormente se tapaban.

Durante los 20 años siguientes al establecimiento de la plantación se monitoreó su crecimiento a través de siete inventarios realizados en los años 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2016 y 2018. En dichos inventarios se midió diámetro (D , cm) con cinta diamétrica a 1.3 m de altura y altura total (H , m) de los árboles con hipsómetro Vertex. A partir de dichos datos, se determinó el área basal y el volumen mediante las siguientes ecuaciones:

$$G = \pi D^2 / 40000$$

donde:

G = área basal ($m^2 ha^{-1}$)

D = diámetro (cm)

$$\text{Volumen} = 0.33 G * H$$

donde:

V = volumen ($m^3 ha^{-1}$)

G = área basal ($m^2 ha^{-1}$)

H = altura (m)

Procesamiento y análisis de datos

Se realizó un análisis longitudinal por medio de un modelo lineal mixto para evaluar el efecto de los diferentes tratamientos de fertilización en el crecimiento (D , H , G y V) de *R. rospigliosii* a través del tiempo. Los modelos consideraron la variable de crecimiento (D , H , G y V) como variable de respuesta y los tratamientos de fertilización (6) y el tiempo como factores fijos, mientras los bloques se trataron como factores aleatorios. El modelo considera adicionalmente el efecto en el crecimiento de la interacción entre los tratamientos y el tiempo. Los mejores modelos se seleccionaron de acuerdo con el criterio de información de Akaike (AIC, *Akaike Information Criteria*, donde el valor inferior indica un mejor modelo), que considera el ajuste y la complejidad del modelo (Zuur, Ieno, Walker, Saveliev y Smith, 2009). Los efectos se consideraron significativos a $p \leq 0.05$. Finalmente, las diferencias en los valores de crecimiento debido a los diferentes tratamientos se evaluaron usando comparaciones múltiples de medias. Los análisis del modelo lineal mixto se realizaron utilizando la función "lme" del paquete "nlme" del programa R 3.1.1 (Pinheiro, Bates, DebRoy y Sarkar, 2015).

TABLA 2. Tratamientos de fertilización probados en la plantación de *Retrophyllum rospigliosii*.

Tratamiento	Concentración ($kg ha^{-1}$) [‡]				
	Nitrógeno	Fosforo	Potasio	Boro	Elementos menores
1 Testigo	0	0	0	0	0.0
2 Testigo + menores	0	0	0	0	5.5
3 25N_10P_20K_B	25	10	20	2	5.5
4 0N_20P_40K_B	50	20	40	2	5.5
5 75N_30P_60K_B	75	30	60	2	5.5
6 50N_20P_0K_B	50	20	0	2	5.5

[‡]Concentración del elemento empleado según las siguientes fuentes: Nitrógeno: NH_4 en presentación Urea a 46% de concentración. Fósforo: P_2O_5 en presentación Superfosfato O-46-O. Potasio: KCl en presentación Cloruro de Potasio O-O-60. Boro: B en presentación Bórax a 15% de concentración. Elementos menores en presentación Microcoljap (S, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn).

RESULTADOS

Se observa una evolución similar en las variables de crecimiento (D , H , G y V) en los diferentes tratamientos durante el periodo estudiado (Fig. 2). En general, el crecimiento de *R. rospigliosii* sigue para las variables evaluadas una forma creciente con diferente asíntota de llegada según el tratamiento de fertilización aplicado. No obstante, el análisis longitudinal evidenció diferencias

significativas en el crecimiento de cada año según el tratamiento de fertilización realizado (Tabla 3; Fig. 3). Adicionalmente, la interacción de los efectos de los tratamientos y el tiempo también fue significativa, indicando que la fertilización influyó en el crecimiento durante todo el periodo de evaluación del experimento. No se encontró efecto de los bloques (efecto aleatorio) dentro del modelo.

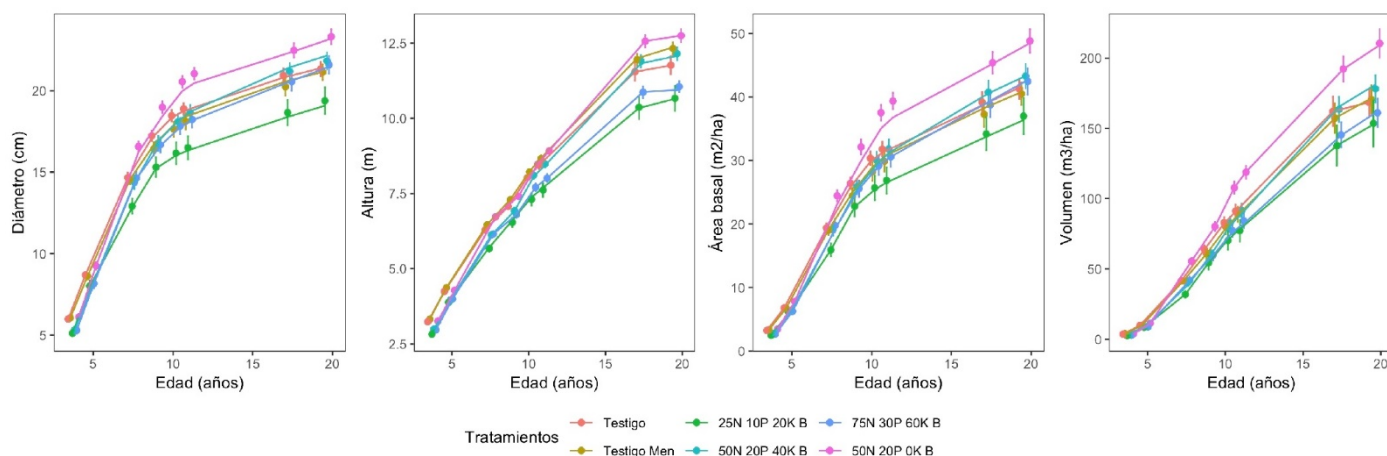


FIGURA 2. Crecimiento en diámetro, altura, área basal y volumen de *Retrophyllum rospigliosii* durante el periodo de evaluación de la plantación.

TABLA 3. Significancia de los modelos ajustados para evaluar el efecto de la fertilización en el crecimiento de *R. rospigliosii*

	Grados de libertad	Diametro	Altura	Area basal	Volumen
		p-value			
Intercepto	1	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0439
Año	7	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Tratamiento	5	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.05
Año: Tratamiento	35	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

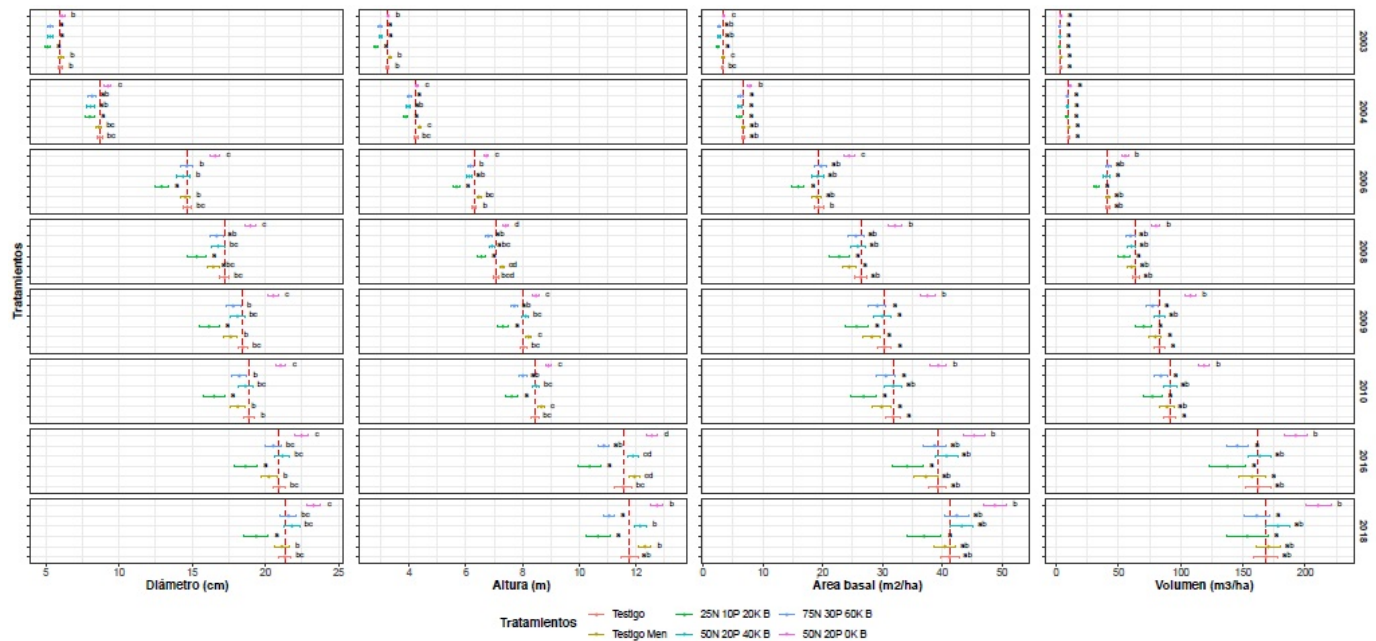


FIGURA 3. Comparaciones múltiples de diámetro, altura, área basal y volumen de *Retrophyllum rospigliosii* durante el periodo de evaluación de la plantación.

Para cada variable de crecimiento y año de evaluación, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.

En general, se encontraron tres grupos significativamente diferentes para diámetro y área basal (el tratamiento 3 con menores valores, los tratamientos testigo, testigo + menores y tratamientos 4 y 5 con valores intermedios, y tratamiento 6 con valores más altos). Para altura y volumen los tratamientos se diferenciaron básicamente en dos grupos. Los grupos de altura estuvieron compuestos por los tratamientos 3 y 4 con menores valores, y los tratamientos testigo, testigo + menores, tratamientos 5 y 6 con mayores valores. Los grupos de volumen estuvieron generalmente compuestos por los tratamientos testigo, testigo + menores, tratamientos 3, 4 y 5 con menores valores, y el tratamiento 6 con los valores más altos. Así, respecto al testigo en el año 2018, el tratamiento 3 (25N_10P_20K_B) conllevó una reducción en el crecimiento cercana a 9%, mientras que el tratamiento 6 conllevó un incremento cercano a 9.2%, 8.4%, 18.4% y 25.0%, respectivamente para D , H , G y V .

DISCUSIÓN

Numerosos estudios se han realizado para evaluar la respuesta del crecimiento de especies forestales bajo diferentes esquemas de fertilización. No obstante, la mayoría de dichos estudios en zonas tropicales han sido para especies introducidas de interés comercial (Alvarado, 2015). Este estudio, hasta donde se conoce, es pionero en evaluar la respuesta a la fertilización química en *R. rospigliosii*, una especie nativa de los bosques altoandinos altamente amenazada (Cogollo *et al.*, 2007; Gardner y Thomas, 2013), con posible interés comercial y para la restauración ecológica.

El incremento en el crecimiento de la plantación de *R. rospigliosii* es, como se ha mencionado en la literatura, relativamente lento; sin embargo, los resultados aquí obtenidos indican un crecimiento ligeramente más rápido en algunos casos. Así, bajo condiciones naturales (en bosques naturales) los crecimientos diamétricos registrados se encuentran entre 0.1 cm y 0.8 cm anuales, de acuerdo

con Becerra y Zevallos (2013), con Lamprecht (1989) y con Veillon (1962), mientras que esta investigación indica que en plantación la especie crece en promedio entre 1.0 cm y 1.2 cm anuales dependiendo del tratamiento (mínimo en tratamiento 3 y máximo en tratamiento 6; Fig. 2). Sin importar el tratamiento de fertilización aplicado, el diámetro tiene un aumento lineal y su ritmo de crecimiento comienza a disminuir aproximadamente a partir del octavo año de plantación (Fig. 2). Ello es relevante para determinar el momento adecuado para las diferentes intervenciones silviculturales de la plantación, si es el caso de la producción maderera o biomasa. En términos de altura, se encuentran registrados promedios entre 0.3 m y 0.6 m por año (Dalling *et al.*, 2011), en este estudio se encontraron valores dentro del margen superior de dicho intervalo (0.53 m y 0.64 m anuales para el tratamiento 3 y 6, respectivamente, Fig. 2). Para área basal no se encontraron valores publicados para la especie, mientras que para el volumen se menciona un rendimiento de 10.5 m³ ha⁻¹ anuales en un estudio similar establecido por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (finca Santa Isabel en Fredonia, Antioquia; datos no publicados). El rendimiento en volumen encontrado en este estudio solo es similar en el caso de la fertilización con el tratamiento 6 (10.5 m³ ha⁻¹ año⁻¹), de lo contrario los rendimientos son inferiores a los registrados (por ejemplo, el tratamiento 3 con 7.7 m³ ha⁻¹ año) (Fig. 2). Todos los rendimientos observados en este estudio para las variables estudiadas de crecimiento se encuentran por debajo de los publicados para cualquier conífera plantada en la zona andina colombiana (Aldana, 2004; Bonilla y Alarcon, 2015; Endo, 1994; Restrepo, 2010).

Retrophyllum rospigliosii se distribuye generalmente en sitios con suelos de baja fertilidad y ácidos a lo largo de los Andes (Tabla 1), lo que lleva a considerar que esta especie depende poco de las propiedades químicas y físicas del suelo (Marín, 1998). No obstante, los resultados de este trabajo indican que la fertilización con elementos mayores y menores tiene un efecto significativo en el crecimiento de *R. rospigliosii* respecto al testigo en términos de diámetro, altura, área basal y volumen (Tabla 1; Fig. 3). Así, una fertilización con potasio y bajos niveles de nitrógeno y

fosforo (tratamiento 3, 25N_10P_20K_B) tiende a reducir el crecimiento de los árboles a largo plazo; mientras una fertilización sin potasio y con un contenido intermedio a alto de nitrógeno y fósforo (tratamiento 6) incrementa significativamente el crecimiento de la especie.

El potasio está asociado a muchas funciones vitales para la vida de las plantas como la fotosíntesis (Sardans y Peñuelas, 2015; Teixeira, Gonçalves, Arthur y Dezordi, 2008; Zhao, Oosterhuis y Bednarz, 2001), la actividad enzimática y síntesis de proteínas (Armengaud *et al.*, 2009), así como la expansión celular y de tejidos (Elumalai, Nagpal y Reed, 2002; Yin *et al.*, 2011). Además, se menciona que una adecuada fertilización con K protege las plantas de presiones bióticas y abióticas como enfermedades, plagas, sequía, entre otras (Sardans y Peñuelas, 2015; Wang, Zheng, Shen y Guo, 2013). No obstante, una fertilización con bajos niveles de potasio, nitrógeno y fósforo como en el tratamiento 3 (25N_10P_20K_B) podría conllevar un desequilibrio de nutrientes y el agotamiento del magnesio (Mg²⁺) debido a la competencia entre los cationes y a la subsiguiente lixiviación del Mg (Guo, Nazim, Liang y Yang, 2016; Maguire y Cowan, 2002). Una reducción del Mg en las árboles lleva una marcada inhibición del crecimiento y el envejecimiento de los tejidos (Verbruggen y Hermans, 2013), dado que se presentan limitaciones estomáticas y una baja asimilación de CO₂, conjuntamente con la reducción de la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Li-li *et al.*, 2009; Novoa, Miranda y Melgarejo, 2018; Verbruggen y Hermans, 2013). Por el contrario, el tratamiento 6 con un contenido intermedio de nitrógeno y fósforo podría indicar un mejor balance de nutrientes y por ende la promoción del crecimiento de *R. rospigliosii* en estos suelos con un aceptable contenido de potasio (Tabla 1).

El mayor crecimiento de *R. rospigliosii* bajo el tratamiento de fertilización intermedia (tratamiento 6) y la reducción del crecimiento con el tratamiento con la más alta concentración de nutrientes (por ejemplo, el tratamiento 5) podría deberse a varios factores que lograrían operar individual o simultáneamente. Entre ellos la adaptación a la baja disponibilidad de nutrientes del suelo (Brodribb, 2011; Coomes y Bellingham, 2011), adaptaciones fisiológicas de



la especie (Bond, 1989) y la presencia de asociaciones de la especie con otros organismos (Dickie y Holdaway, 2011; Diez *et al.*, 2008; Russell, Bidartondo y Butterfield, 2002). La distribución del *R. rospigliosii* en sitios con suelos de baja fertilidad a lo largo de los Andes lleva a considerar que esta especie depende poco de las propiedades químicas y físicas del suelo (Marín, 1998). Así, es posible que *R. rospigliosii* haya desarrollado diferentes rasgos funcionales que le permiten, no solo tolerar suelos con baja disponibilidad de nutrientes, sino también competir satisfactoriamente por los recursos del suelo con otras especies (Bond, 1989; Dalling *et al.*, 2011).

La alta aplicación de fertilizante en suelos derivados de cenizas volcánicas podría limitar la respuesta en crecimiento de la especie (Alvarado, 2015; Alvarado y Raigosa, 2012; Jaramillo, 2002), ya que como lo sugieren Tanner, Vitousek y Cuevas (1998), se podría presentar un incremento en la limitación de N y P en los sustratos más antiguos y así una mayor limitación nutricional. Adicionalmente, se han registrado asociaciones micorrícicas de *R. rospigliosii* en la zona (Diez *et al.*, 2008; Marín, 1998). En general, *R. rospigliosii*, forma una asociación con hongos de la familia Endogonaceae, pertenecientes a los géneros *Acaulospora* y *Glomus*, que favorecen la absorción de fósforo y otros nutrientes (Cueva *et al.*, 2013). Por ejemplo, se ha encontrado, en zonas con suelos deficientes en fósforo, que las podocarpáceas tienen generalmente relaciones nitrógeno-fósforo foliar más bajas que las angiospermas de los bosques donde habitan, lo que sugiere su mayor habilidad para extraer este elemento del suelo (Dalling *et al.*, 2011; Richardson, Peltzer, Allen y McGlone, 2005).

Los resultados muestran que la fertilización realizada al momento de la siembra y cuatro años después persisten durante la rotación de la especie y, por ejemplo, para el tratamiento 6, representa un aumento respecto al testigo de cerca de 25% del volumen (Fig. 2). Ello es relevante dado que diversos estudios de fertilización de bosques de coníferas han indicado efectos limitados a largo plazo de la fertilización o, en los mejores casos, efectos que persisten en los sujetos hasta 10 años después de la última aplicación de fertilizantes (From, Strengbom y Nordin, 2015;

Nohrstedt, 2001). Posiblemente este efecto se deba a que la fertilización temprana favorece un pronto cierre de copas y la reducción de malezas, lo cual, sumado a las adaptaciones de la especie a la baja disponibilidad de nutrientes del suelo, mantiene el efecto a lo largo del tiempo.

Finalmente, la época, la dosis y el método de aplicación de los fertilizantes también podrían influir en la respuesta de la especie. Es poco lo que se conoce de *R. rospigliosii*, por lo que los requerimientos y la etapa fisiológica de crecimiento oportuna de aplicación, donde la demanda se maximiza, no estén claros y como resultado la aplicación de fertilizantes aquí estudiada podría ser mejorada con más información de la ecología de la especie.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican un efecto significativo de la fertilización durante los primeros años de plantación en el crecimiento de *R. rospigliosii* que se mantienen durante los 20 años de rotación de la plantación. Además, la interacción de los efectos de los tratamientos con el tiempo también fue significativa, indicando que la fertilización influyó en el crecimiento durante todo el periodo considerado. Se destaca la necesidad de realizar nuevas investigaciones de mayor alcance, tanto espacial como temporal, para obtener una visión más clara de las estrategias de vida de la especie y comprender los requisitos necesarios que potencialicen aún más el crecimiento y desarrollo de esta especie en plantaciones forestales. Adicionalmente, se debe estudiar cómo las perturbaciones causadas por la cosecha forestal podrían influir en los próximos rodales establecidos de la especie en el sitio.

REFERENCIAS

- Aldana, C. (2004). *Sector forestal colombiano. Fuente de vida, trabajo y bienestar*. Bogotá: CONIF.
- Alvarado, A. (2015). Plant nutrition in tropical forestry. En L. Pancel & M. Köhl (Eds.), *Tropical Forestry Handbook*. Berlin: Springer-Verlag.
- Alvarado, A., & Raigosa, J. (2012). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

- Armengaud, P., Sulpice, R., Miller, A. J., Stitt, M., Amtmann, A., & Gibon, Y. (2009). Multilevel analysis of primary metabolism provides new insights into the role of potassium nutrition for glycolysis and nitrogen assimilation in arabidopsis roots. *Plant Physiology*, 150(2), 772-785. doi:10.1104/pp.108.133629
- Armenteras, D., Gast, F., & Villareal, H. (2003). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation*, 113(2), 245-256. doi: 10.1016/S0006-3207(02)00359-2
- Armenteras, D., Rodriguez, N., Retana, J., & Morales, M. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11(3), 693-705. doi: 10.1007/s10113-010-0200-y
- Arostegui, A., & Sato, A. (1970). Propiedades físico-mecánicas y usos de dos especies de podocarpus (*P. rospigliosii* Pilger; *P. Montanus* var *Meridensis* Bucholz y Gray). *Revista Forestal del Perú*, 4(1-2), 1-10.
- Becerra, V., & Zevallos, P. A. (2013). Determinación del turno de corta de *Cedrela odorata* L., *Retrophyllum rospigliosii* Pilger y *Prumnopitys harmsiana* Pilger a través del estudio dendrocronológico en San Ignacio, región Cajamarca-Perú. *Ceprosimad*, 2(2), 96-102.
- Binkley, D. (1993). *Nutrición forestal: prácticas de manejo*. Mexico: Limusa.
- Bond, W. J. (1989). The tortoise and the hare: ecology of angiosperm dominance and gymnosperm persistence. *Biological Journal of the Linnean Society*, 36(3), 227-249. doi: 10.1111/j.1095-8312.1989.tb00492.x
- Bonilla, J. A., & Alarcon, J. A. (2015). Turnos técnico y económico de tala para árboles de Romerillo blanco en Ecuador. *Ecología Aplicada*, 14(2), 127-137.
- Brodrribb, T. J. (2011). A functional analysis of podocarp ecology. *Smithsonian Contributions to Botany*, 95, 165-173. doi: 10.5479/si.0081024X.95.165
- Cavelier, J., & Tobler, A. (1998). The effect of abandoned plantations of *Pinus patula* and *Cupressus lusitanica* on soils and regeneration of a tropical montane rain forest in Colombia. *Biodiversity & Conservation*, 7(3), 335-347.
- Cernusak, L. A., Adie, H., Bellingham, P. J., Biffin, E., & Brodrribb, T. J. (2011). Podocarpaceae in Tropical Forests: A Synthesis. *Smithsonian Contributions to Botany*, 95, 189-195. doi: 10.5479/si.0081024X.95.189
- Consultorias & Estrategias de Producción Agroecológica y Cafetera [Coesagro] (2004). *Estudio Semidetallado de suelos. Plantaciones forestales distribuidas en los departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda y Caldas*. Cali, Colombia: Smurfit Kappa Carton de Colombia.
- Cogollo, A., Velásquez-Rúa, C., Toro, J. L., & García, N. (2007). Las podocarpáceas. In N. García (Ed.), *Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 5: Las magnoliáceas, las miristicáceas y las podocarpáceas. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia* (pp. 193-224). Bogotá, Colombia: Instituto Alexander von Humboldt - CORANTIOQUIA - Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Coomes, D. A., & Bellingham, P. J. (2011). Temperate and tropical podocarps: How ecologically alike are they? *Smithsonian Contributions to Botany*, 95, 119-140. doi: 10.5479/si.0081024X.95.119
- Cueva, M. N., Velez, D. F., Barrios, T. A., & Nieto, R. V. (2013). *Pino romerón (Retrophyllum rospigliosii (Pilger) C.N. Page), especie nativa potencial para la reforestación en zonas altoandinas de Colombia*. Bogota D.C., Colombia: CONIF, MADR, CINOC.
- Dalling, J. W., Barkan, P., Bellingham, P. J., Healey, J. R., & Tanner, E. V. J. (2011). Ecology and distribution of neotropical podocarpaceae. *Smithsonian Contributions to Botany*, 95, 43-56. doi: 10.5479/si.0081024X.95.43
- Dickie, I., & Holdaway, R. (2011). Podocarp roots, mycorrhizas, and nodules. *Smithsonian Contributions to Botany*, 95, 175-187. doi: 10.5479/si.0081024X.95.175
- Diez, M. C., Osorio, N. W., & Moreno, F. H. (2008). Evaluación de la dependencia micorrizal del Pino Romerón (*Nageia rospigliosii* Pilger) bajo condiciones lumínicas contrastantes. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(2), 4554-4563.
- Elumalai, R. P., Nagpal, P., & Reed, J. W. (2002). A Mutation in the Arabidopsis KT2/KUP2; Potassium Transporter Gene Affects Shoot Cell Expansion. *The Plant Cell*, 14(1), 119-131. doi: 10.1105/tpc.010322
- Endo, M. (1994). CAMCORE: Twelve years of contribution to reforestation in the Andean region of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 63(2-3), 219-233. doi: 10.1016/0378-1127(94)90112-0
- Espinosa, M., Acuña, E., García, J., Rodríguez, R., & Rubilar, R. (2017). *Silvicultura de bosques plantados con fines productivos*. Concepcion, Chile: Sello Editorial Universidad de Concepción.
- From, F., Strengbom, J., & Nordin, A. (2015). Residual long-term effects of forest fertilization on tree growth and nitrogen turnover in boreal forest. *Forests*, 6(4), 1145-1156. doi: 10.3390/f6041145
- García, E., Sotomayor, A., Silva, S., & Valdebenito, G. (2000). *Establecimiento de plantaciones forestales*. Santiago, Chile: INFOR.



- Gardner, M., & Thomas, P. (2013). *Retrophyllum rospigliosii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013.
- González, J., Cubillos, A., Chadid, M., Cubillos, A., Arias, M., Zúñiga, E., . . . , & Berrío, V. (2018). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Programa ONU-REDD Colombia.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, 4(2), 83-91. doi: 10.1016/j.cj.2015.11.003
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Cauca. Escala 1:100.000*. Bogotá: IGAC.
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- Lamprecht, H. (1989). *Silviculture in the tropics: Tropical forest ecosystems and their tree species - possibilities and methods for their long-term utilization*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.
- Li-li, L., Liangzhi, P., Li, C., Cai-lun, J., Changpin, C., Guang-yue, Z., & Zhen-xing, W. (2009). Effect of magnesium deficiency on photosynthesis characteristic of Beibei 447 Jincheng orange. *Journal of Fruit Science*, 26(3), 275-280.
- Maguire, M. E., & Cowan, J. A. (2002). Magnesium chemistry and biochemistry. *BioMetals*, 15(3), 203-210. doi: 10.1023/A:1016058229972
- Marín, A. (1998). *Ecología y Silvicultura de las Podocarpaceas andinas de Colombia*. Cali, Colombia: Smurfit-Cartón de Colombia S.A., Departamento de Investigación Forestal.
- Mill, R. R. (2016). A monographic revision of *Retrophyllum* (Podocarpaceae). *Edinburgh Journal of Botany*, 73(2), 171-261. doi: 10.1017/S0960428616000081
- Nohrstedt, H. O. (2001). Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A review of Swedish experiences. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16(6), 555-573. doi: 10.1080/02827580152699385
- Novoa, M. A., Miranda, D., & Melgarejo, L. M. (2018). Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 293-307. doi: 10.17584/rcch.2018v12i2.8092
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2015). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-122.
- Restrepo, H. I. (2010). *Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita y análisis financiero de plantaciones forestales en Colombia*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Medellín.
- Richardson, S. J., Peltzer, D. A., Allen, R. B., & McGlone, M. S. (2005). Resorption proficiency along a chronosequence: responses among communities and within species. *Ecology*, 86(1), 20-25. doi: 10.1890/04-0524
- Russell, A. J., Bidartondo, M. I., & Butterfield, B. G. (2002). The root nodules of the Podocarpaceae harbour arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 156(2), 283-295. doi: 10.1046/j.1469-8137.2002.00504.x
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2015). Potassium: a neglected nutrient in global change. *Global Ecology and Biogeography*, 24(3), 261-275. doi:10.1111/geb.12259
- Tanner, P. M., Vitousek, P. M., & Cuevas, E. (1998). Experimental investigation of nutrient limitation of forest growth on wet tropical mountains. *Ecology*, 79(1), 10-22. doi: 10.1890/0012-9658(1998)079%5B0010:EIONLO%5D2.0.CO;2
- Teixeira, P. C., Gonçalves, J. L. M., Arthur, J. C., & Dezordi, C. (2008). *Eucalyptus* sp. seedling response to potassium fertilization and soil water. *Ciencia Forestal*, 18(1), 47-63. doi: 10.5902/19805098510
- Turner, B., & Cernusak, L. (2011). *Ecology of the Podocarpaceae in Tropical Forests*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Vásquez-Correa, A. M., & Alcántara-Vara, E. (2009). Anatomía y densidad de la madera de árboles de pino romero [Retrophyllum rospigliosii (Pilger) C.N. Page] de ocho años de edad. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía*, 69(1), 4869- 4880.
- Veillon, J. (1962). *Coníferas autóctonas de Venezuela, los Podocarpus: con especial énfasis sobre las podocarpaceas de la región central del estado Mérida*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales.
- Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and Soil*, 368(1), 87-99. doi: 10.1007/s11104-013-1589-0
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370-7390. doi: 10.3390/ijms14047370
- Yin, X. M., Rocha, P. S. C. F., Wang, M. L., Zhu, Y. X., Li, L. Y., Song, S. F., & Xia, X. (2011). Rice Gene OsDSR-1 Promotes lateral root development in *Arabidopsis* under high-potassium conditions.

Journal of Plant Biology, 54(3), 180-189. doi: 10.1007/s12374-011-9154-y

Zhao, D., Oosterhuis, D. M., & Bednarz, C. W. (2001). Influence of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chlorophyll Content, and Chloroplast Ultrastructure of Cotton Plants. *Photosynthetica*, 39(1), 103-109. doi: 10.1023/A:1012404204910

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. New York: Springer.

Este documento se debe citar como:

Ramírez, J. A., Marín, A., Urrego, J. B., Castaño, Á., & Ospina, R. (2021). Efecto de la fertilización en el crecimiento de *Retrophyllum rospigliosii* de la zona andina colombiana. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732315. doi: 10.21829/myb.2021.2732315

Manuscrito recibido el 06 de febrero de 2021

Aceptado el 19 de agosto de 2021

Publicado el 30 de diciembre de 2021



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.