



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



<https://doi.org/10.14483/2256201X.24185>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Plantaciones exóticas y limitación al establecimiento de plantas nativas en los Cerros Orientales de Bogotá

Exotic Plantations and Limitation to Native Species Establishment in the Eastern Hills of Bogotá

Mauricio Matoma Cardona ^{a,b}, Mauricio Aguilar-Garavito ^c,
Andrés Avella Muñoz ^a, Wilson Ramírez ^d

a Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

b Jardín Botánico José Celestino Mutis. Bogotá, Colombia.

c Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

d Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

Autor para correspondencia

Recibido: 9 de octubre de 2025

Aceptado: 17 de marzo de 2026

Citación: Matoma Cardona, M., Aguilar-Garavito, M., Avella Muñoz, A., & Ramírez, W. (2026). Plantaciones exóticas y limitación al establecimiento de plantas nativas en los Cerros Orientales de Bogotá. *Colombia Forestal*, 29(2), e24185.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.24185>

Highlights

- Dosel y suelo donde crece *Acacia melanoxylon* favorecen ligeramente el crecimiento de nativas.
- Plantaciones forestales de baja densidad facilitan la supervivencia y el crecimiento de nativas.
- Tolerancia a la sombra: proxy funcional que define la supervivencia de nativas.
- Pendiente y estructura densa de la plantación actúan como limitantes del crecimiento.
- Se sugiere un manejo silvicultural que equilibre supervivencia inicial y crecimiento de nativas.

Resumen

Se evaluó la influencia de las condiciones del sitio en plantaciones exóticas de *Eucalyptus globulus* y *Acacia melanoxylon*, junto con la tolerancia a la sombra en el establecimiento de especies nativas en los Cerros Orientales de Bogotá. Se plantaron siete especies nativas bajo el dosel de estas plantaciones de exóticas y se monitoreó su supervivencia y crecimiento durante 2.5 años. Los resultados revelaron una compensación: la supervivencia fue mayor en especies tolerantes a la sombra y se vio favorecida por la alta densidad

de la plantación. En contraste, el crecimiento fue limitado por la alta densidad, la cobertura del dosel y la pendiente, aunque fue ligeramente mayor bajo *A. melanoxyton*. Estos hallazgos demuestran que la restauración bajo doseles exóticos es viable, pero requiere un manejo silvicultural cuidadoso y detallado para equilibrar la facilitación en la supervivencia con la competencia que limita el crecimiento de las especies nativas en el mediano plazo.

Palabras clave: dosel, plantación forestal mixta, plántula, regeneración natural, tolerancia a la sombra

Abstract

We evaluated the influence of site conditions in exotic *Eucalyptus globulus* and *Acacia melanoxyton* plantations, alongside shade tolerance, on the establishment of native species in the Eastern Hills of Bogotá. Seven native species were underplanted beneath the canopies of these exotic plantations, and their survival and growth were monitored for 2.5 years. Results revealed a trade-off: survival was higher for shade-tolerant species and was positively influenced by plantation density. In contrast, growth was limited by high density, canopy cover, and slope, although it was greater under *A. melanoxyton*. These findings demonstrate that restoration under exotic canopies is viable, but it requires careful and detailed silvicultural management to balance the facilitative effects on survival with the competition that limits the growth of native species in the medium term.

Keywords: Canopy, mixed Forest plantation, seedling, natural regeneration, shade tolerance

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales son una estrategia de manejo silvicultural ampliamente utilizada para restablecer servicios ecosistémicos y para reducir la presión sobre bosques nativos (Brancalion *et al.*, 2020; Messier *et al.*, 2022). Sin embargo, los monocultivos exóticos con manejo mínimo pueden impactar negativamente la biodiversidad al homogeneizar ecosistemas, reducir hábitats para la flora y fauna nativas y facilitar la invasión de especies que alteran la dinámica local (Castaño-Villa *et al.*, 2019; Deus *et al.*, 2019).

La vulnerabilidad de las plantaciones forestales exóticas frente al cambio climático y la pérdida de biodiversidad subraya la necesidad de aumentar su resiliencia. Una estrategia prometedora consiste en transformarlas en plantaciones mixtas mediante enriquecimiento con especies nativas y manejo silvicultural, incluyendo la apertura del dosel (Kremer & Bauhus, 2020; Messier *et al.*, 2022). No obstante, el éxito de estas intervenciones depende de comprender cómo las condiciones del sitio, resultantes de la interacción entre factores edáficos, topográficos y estructurales de la plantación, actúan como filtros ecológicos que pueden facilitar o limitar el establecimiento temprano de especies nativas.

Las características estructurales y de manejo de las plantaciones forestales ejercen efectos complejos y a menudo contrapuestos sobre la regeneración de especies nativas y las propiedades del suelo. Por un lado, una alta biomasa puede limitar la supervivencia nativa al intensificar la competencia y reducir el carbono orgánico del suelo (Luo *et al.*, 2020), aunque también puede generar un efecto nodriza favorable (Brancalion *et al.*, 2020; Simões *et al.*, 2024). De manera similar, la falta de manejo silvicultural, principalmente asociado a entresacas y podas de formación, pueden cerrar el dosel y obstaculizar la regeneración natural

([Kremer & Bauhus, 2020](#)); no obstante, un dosel cerrado también puede promover la regeneración natural al suprimir especies invasoras y mitigar filtros ambientales como la sequía o las altas temperaturas ([Simões et al., 2024](#); [Verheyen et al., 2024](#)). Adicionalmente, atributos de las plantaciones como la competencia radicular y la acumulación de hojarasca alteran la fisicoquímica del suelo, inhibiendo la actividad microbiana y el reciclaje de nutrientes ([Ehlers et al., 2020](#); [Fujii et al., 2020](#); [Marian et al., 2020](#)), con una notable limitación en la disponibilidad de fósforo ([Bueis et al., 2019](#)). Este conjunto de efectos antagónicos evidencia la necesidad de estudiar estas interacciones para orientar el manejo de plantaciones exóticas.

En los cerros orientales de Bogotá, principalmente durante las décadas de 1960 y 1970, se establecieron plantaciones forestales de especies exóticas como *Eucalyptus globulus* Labill. y *Acacia melanoxylon* R. Br para recuperar la cobertura vegetal y proteger los suelos ([Saavedra-Ramírez et al., 2018](#)). Su selección obedeció a criterios como su rápido crecimiento y adaptabilidad ([Turnbull, 1999](#)). A pesar de que las normativas ambientales actuales promueven su reemplazo gradual por bosques nativos, los esfuerzos previos se han enfocado principalmente en seleccionar especies a partir de inventarios florísticos ([Salamanca & Camargo, 2000](#); [Rojas, 2017](#)), sin una evaluación detallada de las condiciones de sitio que determinan su establecimiento. Este enfoque evidencia un vacío de conocimiento más amplio en la región andina, donde las investigaciones se han centrado en análisis descriptivos en lugar de estudios experimentales que evalúen los factores ecológicos que regulan la restauración, así como una falta de conocimiento regional a largo plazo sobre las trayectorias de recuperación de los bosques andinos ([Rodríguez, 2022](#); [Christmann et al., 2023](#)).

Para abordar este vacío de conocimiento, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de las condiciones bióticas y abióticas del sitio, junto con la tolerancia a la sombra, sobre el establecimiento temprano de especies nativas bajo el dosel de plantaciones exóticas. El establecimiento se definió como la supervivencia y el incremento periódico anual (IPA) en altura y diámetro de las plántulas. Se seleccionaron especies representativas de grupos funcionales contrastantes: intolerantes a la sombra, características de las etapas tempranas de recuperación, y tolerantes, capaces de establecerse bajo el dosel sombreado propio de fases sucesionales más avanzadas.

Las variables del sitio evaluadas actúan como filtros ecológicos que condicionan la regeneración según los rasgos funcionales de las especies nativas. Bajo este marco, se plantearon las siguientes hipótesis: 1) la estrategia de tolerancia a la sombra determinará el éxito diferencial de las especies, donde las especies tolerantes presentarán una mayor supervivencia, pero menores tasas de crecimiento que las intolerantes bajo dosel cerrado; 2) la densidad de la plantación y la cobertura del dosel ejercerán un efecto dual, facilitando la supervivencia inicial al mitigar el estrés ambiental (efecto nodriza), pero limitando el crecimiento debido a la competencia por recursos lumínicos; 3) factores como la pendiente pronunciada y la baja disponibilidad de fósforo y carbono orgánico, afectarán negativamente el desempeño de las plántulas independientemente de su grupo funcional; y 4) la identidad de la especie exótica modulará diferencialmente el establecimiento; se predice un mayor éxito bajo *A. melanoxylon* debido a la facilitación por mejora en las condiciones del suelo (particularmente nitrógeno) y una estructura de dosel más heterogénea, en contraste con *E. globulus*. Estas hipótesis buscan identificar si las interacciones complementarias entre especies pueden superar las limitaciones de reclutamiento al optimizar el uso de recursos ([Forrester & Bauhus, 2016](#)), orientando la sustitución de plantaciones exóticas en los Cerros Orientales de Bogotá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en el predio Venado de Oro (04°35'52.2" N - 74°03'42.0" W), sede del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), donde se tiene un área piloto de investigación en restauración entre el Instituto y el Jardín Botánico José Celestino Mutis (JBB). El predio se encuentra ubicado en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. El sitio corresponde a un ecosistema de bosque altoandino a 2700 m de altitud, con una temperatura media de 12.7 °C y una precipitación anual de 1143 mm ([Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca \[CAR\], 2006](#)). El paisaje está dominado por plantaciones de *A. melanoxylon* y *E. globulus*, las cuales fueron intervenidas mediante una tala selectiva como parte de una estrategia de restauración enfocada en su sustitución.

Diseño experimental y medición de variables

En noviembre de 2019 se establecieron 100 parcelas circulares nucleadas bajo tres tipos de cobertura forestal: *E. globulus* (34 parcelas), *A. melanoxylon* (33 parcelas) y plantaciones mixtas con estas dos especies exóticas (33 parcelas). Cada parcela se ubicó con una distancia mínima de 10 m entre parcelas y 1 m entre individuos, y estuvo conformada por 21 plántulas, con tres individuos de cada una de las siete especies nativas seleccionadas, para un total de 2 100 individuos en el experimento y se registraron las condiciones iniciales de cada individuo (altura total y diámetro basal). El diseño experimental se desarrolló exclusivamente en plantaciones forestales exóticas, por lo que no se evaluaron sitios de control en bosque nativo.

Las especies se categorizaron en dos grupos funcionales basados en sus síndromes de regeneración: intolerantes a la sombra (*Myrcianthes leucoxyla* (Ortega) McVaugh, *Escallonia paniculata* (Ruiz y Pav.) Schult., *Viburnum triphyllum* Benth.), caracterizadas por una estrategia adquisitiva y dependencia de claros, y tolerantes (*Cedrela montana* Moritz ex Turcz, *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C.N. Page, *Oreopanax incisus* (Willd. ex Schult) Decne y Planch., *Myrsine guianensis* (Aubl.) Kuntze), que priorizan la conservación de recursos y la persistencia bajo dosel.

En cada parcela se caracterizaron las variables del sitio: porcentaje de pendiente con un clinómetro Haglöl CI Gen 2; cobertura de dosel con un densiómetro esférico cóncavo; porcentaje de sotobosque herbáceo (mediante un conteo en cuadrícula de 100 cm de lado); y densidad (DAP) y área basal de la plantación exótica en un radio de 7 m ([Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales \[IDEAM\], 2018](#)). Además, se evaluó el contenido de carbono orgánico mediante el método de Walkley ([Walkley, 1947](#)) y el fósforo disponible con la metodología Bray II-espectrofotométrica, modificada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y adaptada para suelos colombianos. También se caracterizaron propiedades físicas y químicas del suelo como densidad aparente, pH, Calcio, Magnesio y Potasio ([Soil Survey Staff, 2014](#)).

En mayo de 2022, 2.5 años después del establecimiento, se midió la supervivencia y el crecimiento de las plántulas y se calculó el incremento periódico anual (IPA) de altura (cm.año⁻¹) y diámetro (mm.año⁻¹) como la diferencia entre dos mediciones sucesivas dividida por el número de años transcurridos ([Prodan et al., 1997](#)), a través de la fórmula:

$$IPA = \frac{(medición\ final - medición\ inicial)}{(tiempo\ final - tiempo\ inicial)} \quad [1]$$

Análisis de datos

Se evaluó la influencia de las variables de sitio y la tolerancia a la sombra sobre la supervivencia y el crecimiento de las especies nativas mediante Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM), los cuales son idóneos para modelar datos con distribuciones no normales y permiten incorporar una estructura de errores jerárquica (Zuur & Ieno, 2016). Los modelos se ajustaron con distribución de error gaussiana y una función de enlace identidad, adecuadas para las variables de respuestas continuas de crecimiento y supervivencia. La selección de las variables finales para los modelos se realizó siguiendo un criterio de dos pasos para asegurar su parsimonia y robustez. Primero, se diagnosticó la multicolinealidad entre las variables predictoras mediante el Factor de Inflación de Varianza (VIF), descartando aquellas con un valor de VIF > 2 para evitar variables redundantes en los modelos. En este caso, se descartaron las variables: densidad aparente, pH, Calcio, Magnesio y Potasio. Posteriormente, a partir del conjunto de variables no colineales, se seleccionó el modelo más parsimonioso con base en el Criterio de Información de Akaike (AIC) (Zuur et al., 2009). Adicionalmente, se evaluó la interacción entre el tipo de plantación y la tolerancia a la sombra de las especies nativas. Sin embargo, dicha interacción no resultó ser un predictor significativo para ninguna de las variables respuesta, por lo que fue excluida de los modelos finales. En todos los modelos, la parcela y la especie nativa fueron incluidas como efectos aleatorios para prevenir pseudorreplicación y controlar la variabilidad no explicada inherente a cada taxón. Los análisis se realizaron en R versión 4.5.0 (R Core Team, 2025), utilizando los paquetes FactoMineR (Lê et al., 2008), lme4 (Bates et al., 2015), ggeffects (Lüdtke, 2018), performance (Lüdtke et al., 2021) y ggplot2 (Wickham, 2016).

RESULTADOS

Supervivencia de las especies nativas plantadas bajo el dosel de plantaciones forestales

La supervivencia de las plántulas estuvo determinada positivamente por la densidad de la plantación de exóticas ($\beta = 0.02$, $p < 0.001$) y la estrategia de tolerancia a la sombra de las especies nativas (AIC = -393.8; R^2 condicional = 0.75; R^2 marginal = 0.12). Las especies tolerantes a la sombra mostraron una supervivencia significativamente mayor (91 %) que las intolerantes (69 %) (Tabla 1; Figura 1). *M. guianensis* fue la especie con mayor supervivencia (97.3 %), mientras que en *E. paniculata* se reportó la menor supervivencia (30.3 %) (Anexo 1).

Crecimiento de las especies nativas plantadas bajo el dosel de plantaciones forestales exóticas

El crecimiento en altura (IPA; AIC = 4746.1; R^2 condicional = 0.49; R^2 marginal = 0.15) fue ligeramente mayor en plantaciones de *A. melanoxylon* (43.6 cm·año⁻¹) y se vio afectado negativamente por la pendiente ($\beta = -0.10$, $p < 0.05$), la cobertura del dosel ($\beta = -0.18$, $p < 0.001$) y la densidad de la plantación ($\beta = -0.99$, $p < 0.001$) (Tabla 1; Figura 1). El crecimiento en diámetro (IPA; AIC = 1744.8; R^2 condicional = 0.55; R^2 marginal = 0.22) también fue ligeramente mayor bajo *A. melanoxylon* (4.63 mm·año⁻¹) y disminuyó con el aumento de la pendiente, el dosel, el área basal y la densidad de la plantación ($p < 0.05$). En contraste, la cobertura herbácea tuvo un efecto

positivo sobre el crecimiento en diámetro ($\beta = 0.01$, $p < 0.05$). La tolerancia a la sombra no influyó significativamente en ninguna de las variables de crecimiento ($p > 0.05$).

DISCUSIÓN

La supervivencia no fue determinada por las condiciones del sitio, pero si por la tolerancia a la sombra

Los resultados de este estudio indican que la tolerancia a la sombra fue el factor más determinante para el establecimiento inicial de las especies nativas plantadas, con una supervivencia significativamente mayor para las especies tolerantes (91 %) en comparación con las intolerantes (69 %) (Tabla 1; Figura 1). De manera contraria a lo esperado, la densidad de la plantación fue el único atributo del sitio que influyó positivamente en la supervivencia, mientras que otras variables como la pendiente o la cobertura herbácea no mostraron efectos significativos. Aunque una alta densidad suele ser limitante (Kremer & Bauhus, 2020), este hallazgo

Tabla 1. Resultados de los modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) que evalúan los factores asociados a la supervivencia, el Incremento Periódico Anual (IPA) en altura ($\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$) y el Incremento Periódico Anual (IPA) en diámetro ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) de las especies nativas. Se muestra el coeficiente de regresión (B), su error estándar, el estadístico t (t-valor) y la significancia estadística (p-valor). Los valores de $p < 0.05$ indican un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta.

		Coeficiente (B)	Error estándar	t-valor	p-valor
Supervivencia	Intolerante	0.69	0.14	4.99	<0.05
	Tolerante	0.91	0.12	7.55	<0.05
	Densidad plantación	0.02	0.01	2.06	<0.05
	<i>Acacia melanoxylon</i>	43.63	7.29	5.98	<0.05
	<i>Acacia melanoxylon</i> - <i>Eucalyptus globulus</i>	39.56	7.09	5.58	<0.05
	<i>Eucalyptus globulus</i>	36.30	6.71	5.41	<0.05
IPA Altura ($\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$)	Tolerante	-6.61	3.49	-1.89	0.12
	Pendiente	-0.10	0.06	-1.72	<0.05
	Dosel	-0.18	0.08	-2.36	<0.05
	Cobertura herbácea	-0.04	0.03	-1.23	0.09
	Densidad plantación	-0.99	0.51	-1.94	<0.05
	<i>Acacia melanoxylon</i>	4.63	0.71	6.48	<0.05
	<i>Acacia melanoxylon</i> - <i>Eucalyptus globulus</i>	4.58	0.69	6.66	<0.05
	<i>Eucalyptus globulus</i>	4.32	0.65	6.63	<0.05
	Tolerante	0.82	0.32	2.53	<0.05
IPA Diámetro ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$)	Pendiente	-0.01	0.01	-2.44	<0.05
	Dosel	-0.03	0.01	-4.45	<0.05
	Cobertura herbácea	0.00	0.00	1.49	<0.05
	Área basal	-0.09	0.07	-1.22	<0.05
	Densidad plantación	-0.08	0.05	-1.66	<0.05

es consistente con estudios en sitios degradados (Forbes *et al.*, 2019), donde un dosel más cerrado puede favorecer la regeneración al mitigar la competencia con especies invasoras y amortiguar factores tensionantes como la sequía (Simões *et al.*, 2024; Verheyen *et al.*, 2024). Estos resultados respaldan la teoría de la facilitación (Connell & Slatyer, 1977), la cual sugiere que, bajo ciertas condiciones, las plantaciones exóticas pueden actuar como sistemas nodriza que promueven la supervivencia de especies nativas en las primeras etapas de la restauración (Lugo, 1997). No obstante, el efecto facilitador de la densidad está condicionado a las características específicas de las plantaciones estudiadas, y no es recomendable extrapolar esta tendencia a densidades mucho mayores, donde la competencia por luz y otros recursos se intensificaría hasta convertirse en un factor limitante, como se observó en la evaluación del crecimiento.

La importancia de la tolerancia a la sombra para la supervivencia bajo dosel es coherente con estudios que demuestran la mayor viabilidad de especies tolerantes en ambientes de baja luminosidad (Toledo-Aceves *et al.*, 2022).

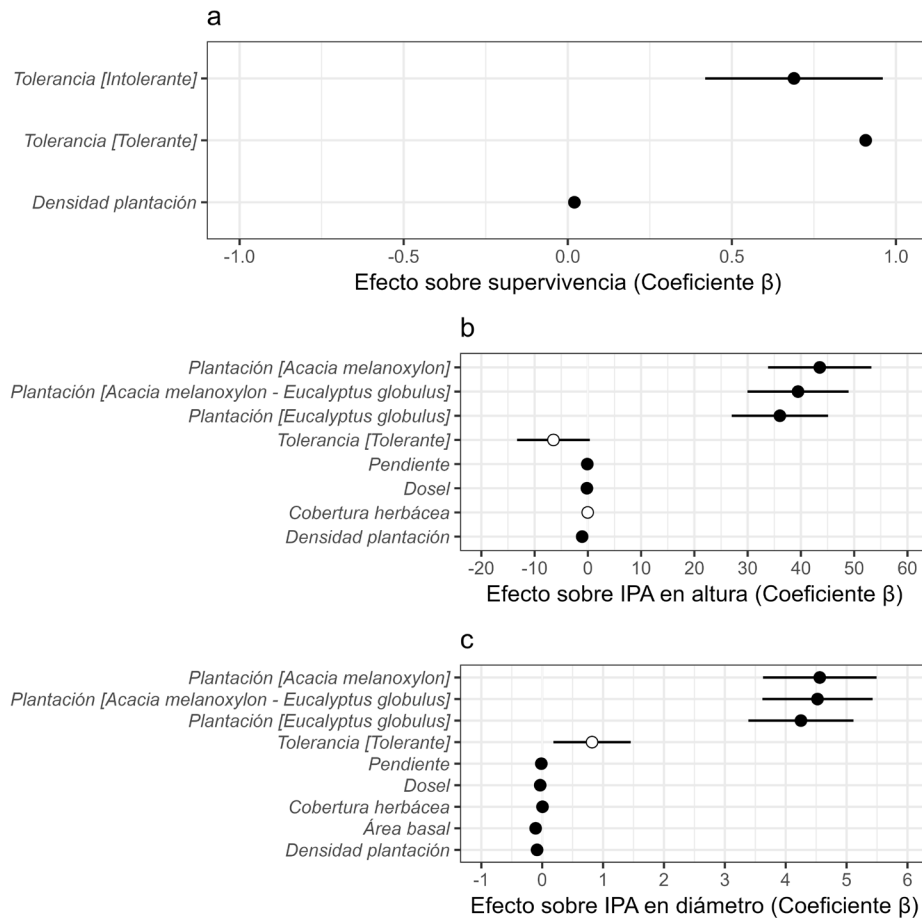


Figura 1. Estimaciones de los coeficientes (B) de los modelos lineales generalizados mixtos para a) Supervivencia, b) Incremento Periódico Anual (IPA) en altura y c) el Incremento Periódico Anual (IPA) en Diámetro de las plántulas nativas. Los puntos representan el valor estimado del coeficiente y las líneas horizontales sus intervalos de confianza al 95%. Los puntos negros indican un efecto estadísticamente significativo, mientras que los puntos blancos indican efectos no significativos.

Este resultado se alinea con las estrategias de vida de [Grime \(1977\)](#), donde la supervivencia en la sombra se asocia más con la persistencia en condiciones de estrés que con la maximización de la biomasa, lo cual es posible gracias a adaptaciones funcionales como la optimización del área foliar y ajustes fotosintéticos ([Gommers et al., 2013](#)). No obstante, es crucial reconocer que los requerimientos lumínicos a menudo pueden depender de otros factores limitantes ([Valladares & Niinemets, 2008](#)).

En conjunto, las condiciones microclimáticas modificadas por la densidad de las plantaciones y la capacidad de las especies para tolerar bajos niveles de luz parecen ser factores determinantes en las primeras etapas del establecimiento ([Valladares & Niinemets, 2008](#)). Estos hallazgos destacan la necesidad de considerar tanto la estructura de las plantaciones como las características funcionales de las especies nativas en esfuerzos de restauración, sin olvidar aspectos de manejo básicos como la procedencia, la calidad genética y los cuidados tempranos de las especies seleccionadas.

El crecimiento fue determinado por las condiciones del sitio, no por la tolerancia a la sombra

A diferencia de la supervivencia, el crecimiento de las plántulas mostró variaciones sutiles entre las coberturas exóticas, aunque con una tendencia favorable bajo *A. melanoxydon*. Esta ligera diferencia sugiere que, en etapas tempranas de establecimiento (2.5 años), los rasgos funcionales de las especies introducidas aún no han modificado el microclima o el suelo de forma lo suficientemente drástica para generar respuestas divergentes en la biomasa nativa. El mayor IPA bajo *A. melanoxydon* podría explicarse a través de interacciones directas entre plantas y una rápida circulación de nutrientes en el micrositio, más que por diferencias en los elementos acumulados en el suelo. La falta de variaciones significativas en C y P sugiere que los nutrientes aportados por *A. melanoxydon*, especialmente formas asimilables de N, son absorbidos rápidamente por las plántulas nativas, favoreciendo su crecimiento a pesar de la competencia radicular o la posible presencia de compuestos secundarios ([Hussain et al., 2011](#)). Bajo esta lógica, y considerando que el N no fue cuantificado directamente, este mecanismo se propone como una hipótesis fundamentada en el potencial fijador de la especie ([Brockwell et al., 2005](#)), la cual operaría a escala de micrositio siempre que no sea neutralizada por las interferencias bióticas anteriormente descritas.

El aumento de la pendiente impactó negativamente el crecimiento, probablemente debido a una menor capacidad de retención de agua y mayor erosión del suelo ([Jourgholami et al., 2020](#); [Liang et al., 2023](#); [Liang & Wei, 2020](#)). Este efecto se atribuye a una intensificación de la competencia por recursos subterráneos en estas fases iniciales de desarrollo ([Gerhardt, 1996](#)). Es notable que, mientras la densidad de la plantación favoreció la supervivencia inicial (efecto nodriza), el resultado inverso observado en el crecimiento confirma que la competencia radicular por agua y nutrientes se convierte en el filtro dominante, particularmente por el carbono orgánico, cuyas reservas en el suelo pueden disminuir en plantaciones con alta biomasa ([Mondragón et al., 2022](#)).

Por otra parte, el hecho de que la tolerancia a la sombra no determinara el crecimiento refuta parcialmente la Hipótesis 1. Si bien se esperaba un mayor incremento en las especies intolerantes bajo una lógica adquisitiva, la densa cobertura de ambas plantaciones pudo mantener los niveles de luz por debajo del umbral de saturación fotosintética necesario para estas especies ([Gommers et al., 2013](#)). Este hallazgo subraya que el efecto dual de la estructura (Hipótesis 2) es el filtro dominante en los Cerros Orientales: la densidad actúa como un facilitador crítico para la supervivencia mediante la mitigación del estrés hídrico.

Es importante reconocer que factores no medidos en esta investigación pudieron haber influido en los patrones de supervivencia y crecimiento observados. La competencia radicular por agua y nutrientes, un factor conocido por su relevancia en plantaciones densas, no fue cuantificada y podría interactuar con las condiciones del dosel (Gerhardt, 1996). Asimismo, la calidad y variabilidad fisiológica inicial de las plántulas nativas (Beck *et al.*, 2008), así como la presión por herbivoría, son variables que pueden tener impacto significativo en el éxito del establecimiento y que no fueron objeto de evaluación directa. Futuros estudios deberían considerar estos elementos para obtener una comprensión más integral de las complejas interacciones que regulan el establecimiento de plántulas bajo el dosel de plantaciones exóticas. Finalmente, se reconoce que la ausencia de un sitio control en bosque nativo o área abierta limita la contextualización del crecimiento observado respecto a los rangos óptimos regionales. Esta limitación implica que los resultados deben interpretarse estrictamente como el desempeño diferencial bajo doseles exóticos en proceso de restauración asistida.

Implicaciones para el manejo

El reemplazo gradual de plantaciones exóticas mediante enriquecimiento bajo dosel es una técnica de restauración y manejo forestal prometedora, siempre que se consideren tanto las limitaciones impuestas por las características del sitio, las condiciones estructurales de la plantación y las estrategias funcionales de las especies nativas a introducir, particularmente su tolerancia a la sombra. Nuestros resultados destacan que el manejo silvicultural de la estructura aérea y radicular es el factor determinante para el éxito de la restauración, por encima de las propiedades químicas del suelo en el corto plazo. Por lo tanto, se sugiere un manejo silvicultural adaptativo: mantener densidades elevadas durante la fase crítica de trasplante para asegurar la supervivencia y, posteriormente, realizar raleos o aperturas graduales de copas para liberar el potencial de crecimiento de las nativas y evitar el estancamiento sucesional. Este enfoque permite mitigar las limitaciones del sitio mediante la manipulación técnica de la competencia (Holl & Aide, 2011; Brancalion *et al.*, 2020).

Se recomienda un manejo activo del dosel para regular la luz y, en el mediano y largo plazo, reducir la densidad y el área basal gradualmente mediante la remoción de individuos exóticos (Brown *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2021; Puettmann *et al.*, 2016), complementado con un deshierbe selectivo que conserve parte de la cobertura herbácea para mantener sus efectos microclimáticos positivos. Finalmente, se reconoce que, si bien este estudio avanza en la comprensión del establecimiento temprano, es necesario investigar otras etapas del reclutamiento en contextos tanto rurales como urbanos para generar lineamientos de restauración y manejo más robustos (Acácio *et al.*, 2007; Palma *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

La introducción de individuos de especies nativas bajo el dosel de plantaciones exóticas puede mejorar la diversidad y contribuir al proceso de sustitución y restauración de ecosistemas degradados, pero requiere un manejo cuidadoso de las condiciones ambientales para optimizar la supervivencia y el crecimiento de las especies plantadas. Prácticas de manejo silvicultural, como talas, podas y apertura de copas, y el enriquecimiento con especies nativas con diferentes estrategias de tolerancia a la sombra, pueden ser adaptadas a las características específicas de cada plantación forestal con especies exóticas para maximizar los beneficios

ecológicos y minimizar los impactos negativos sobre el ecosistema restaurado; esto es especialmente relevante en el contexto de los cerros de una urbe de la escala de Bogotá, donde son cada vez más frecuentes tanto las iniciativas de sustitución de plantaciones forestales de exóticas como la mitigación de los efectos de los recientes incendios forestales.

Desde un enfoque pragmático, la restauración no debe contemplar la erradicación total inmediata de las plantaciones exóticas, sino su manejo como sistemas nodriza para facilitar la sucesión de especies nativas. Remociones drásticas de la cobertura exótica en la región, como las ocurridas en el Embalse del Neusa, demuestran que la eliminación masiva de la biomasa arbórea puede desencadenar invasiones biológicas agresivas por especies como *Ulex europaeus* L. (retamo espinoso). Este riesgo se intensifica debido a que los bancos de semillas bajo plantaciones exóticas están dominados por hierbas y poseen una escasa representación de especies arbóreas nativas. Por lo tanto, un reemplazo gradual y asistido, fundamentado en el manejo silvicultural del dosel y la reintroducción activa de plántulas, es esencial para asegurar la consolidación de la flora nativa y evitar el secuestro de la sucesión. Aunque no se pretende fomentar la expansión de las plantaciones forestales de exóticas, estas especies pueden crear condiciones que faciliten el restablecimiento de flora nativa en sitios degradados, actuando como una transición hacia ecosistemas más diversos, bajo este contexto de gestión, el reemplazamiento gradual, el manejo silvicultural activo y el monitoreo y seguimiento son la clave.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de este estudio por parte de la Subdirección Científica del Jardín Botánico José Celestino Mutis (JBB) y del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), a través del Convenio JBB-C-004 de 2019. Asimismo, expresan su reconocimiento a Claudia Alexandra Pinzón, Alba González y Paola Isaacs por su valioso apoyo en la gestión del proyecto. El trabajo de campo fue posible gracias a la colaboración de Enoc Sánchez, José Amado, Carlos González y Eli Arias (JBB), quienes participaron en las labores de plantación y mantenimiento, así como de Alejandra Tirado (Universidad Distrital Francisco José de Caldas), por su apoyo logístico. Finalmente, los autores agradecen a los profesores Roy González (Universidad del Tolima) y Ángela Parrado (Universidad Distrital Francisco José de Caldas) por sus valiosos comentarios y aportes durante la preparación del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

M.M.C., M.A.G. y W.R. idearon la investigación; M.M.C., M.A.G. llevaron a cabo la investigación en terreno; M.M.C., M.A.G. y A.A.M. analizaron los datos y redactaron el manuscrito. Todos los autores contribuyeron a la discusión y comentaron los borradores.

DECLARACIÓN DE USO DE IA

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron la herramienta Gemini (Google) con el propósito de realizar la revisión gramatical y mejorar la redacción académica. Se usaron prompts con instrucciones técnicas para optimizar la fluidez narrativa del texto. El contenido sugerido por la herramienta fue integrado al manuscrito final mediante una modificación sustancial. Los autores revisaron, verificaron y editaron exhaustivamente todas las sugerencias generadas por IA antes de su incorporación y asumen la responsabilidad total por la integridad, originalidad y veracidad de la información presentada en esta publicación.

REFERENCIAS

- Acácio, V., Holmgren, M., Jansen, P. A., & Schrotter, O. (2007). Multiple recruitment limitation causes arrested succession in Mediterranean cork oak systems. *Ecosystems*, 10, 1220–1230.
<https://doi.org/10.1007/s10021-007-9089-9>
- Basto, S., Roa-Fuentes, L., Moreno, A. C., & Barrera-Cataño, J. I. (2020). Seed bank responses after clearcutting *Pinus patula* plantations in Andean high montane areas. *Universitas Scientiarum*, 25(3), 517–543.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC25-3.sbra>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beck, E., Hartig, K., Roos, K., Preußig, M., & Nebel, M. (2008). Permanent removal of the forest: Construction of roads and power supply lines. In E. Beck, J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, & R. Mosandl (Eds.), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador* (pp. 361–370). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_34
- Brancalion, P. H. S., Amazonas, N. T., Chazdon, R. L., van Melis, J., Rodrigues, R. R., Silva, C. C., Sorrini, T. B., & Holl, K. D. (2020). Exotic eucalypts: From demonized trees to allies of tropical forest restoration? *Journal of Applied Ecology*, 57(1), 55–66.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.13513>
- Brockwell, J., Searle, S. D., Jeavons, A. C., & Waayers, M. (2005). *Nitrogen fixation in Acacias: An untapped resource for sustainable plantations, farm forestry and land reclamation* (ACIAR Monograph No. 115). Australian Centre for International Agricultural Research.
<https://www.aciar.gov.au/sites/default/files/legacy/node/619/mn115part1.pdf>
- Brown, G. W., Murphy, A., Fanson, B., & Tolsma, A. (2019). The influence of different restoration thinning treatments on tree growth in a depleted forest system. *Forest Ecology and Management*, 437, 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.022>

- Bueis, T., Bravo, F., Pando, V., Kissi, Y. A., & Turrión, M. B. (2019). Phosphorus availability in relation to soil properties and forest productivity in *Pinus sylvestris* L. plantations. *Annals of Forest Science*, 76(4), 97.
<https://doi.org/10.1007/s13595-019-0882-3>
- Castaño-Villa, G. J., Estevez, J. V., Guevara, G., Bohada-Murillo, M., & Fontúrbel, F. E. (2019). Differential effects of forestry plantations on bird diversity: A global assessment. *Forest Ecology and Management*, 440, 202–207.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.025>
- Christmann, T., Palomeque, X., Armenteras, D., Wilson, S. J., Malhi, Y., & Oliveras Menor, I. (2023). Disrupted montane forest recovery hinders biodiversity conservation in the tropical Andes. *Global Ecology and Biogeography*, 32(5), 793–808.
<https://doi.org/10.1111/geb.13666>
- Connell, J. H., & Slatyer, R. O. (1977). Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist*, 111(982), 1119–1144.
<https://doi.org/10.1086/283241>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). *Plan de manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá*. CAR.
<https://www.car.gov.co/vercontenido/173>
- Deus, E., Silva, J. S., Lacombe, M. J., Catry, F. X., Queirós, L., dos Santos, P., Matias, H., Águas, A., & Rego, F. C. (2019). Investigating the invasiveness of *Eucalyptus globulus* in Portugal: site-scale drivers, reproductive capacity and dispersal potential. *Biological Invasions*, 21(6), 2027–2044.
<https://doi.org/10.1007/s10530-019-01954-6>
- Ehlers, B. K., Berg, M. P., Staudt, M., Holmstrup, M., Glasius, M., Ellers, J., Tomiolo, S., Madsen, R. B., Slotsbo, S., & Penuelas, J. (2020). Plant secondary compounds in soil and their role in belowground species interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(8), 716–730.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.04.001>
- Forbes, A. S., Norton, D. A., & Carswell, F. E. (2019). Opportunities and limitations of exotic *Pinus radiata* as a facilitative nurse for New Zealand indigenous forest restoration. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 49.
<https://doi.org/10.33494/nzjfs492019x45x>
- Forrester, D. I., & Bauhus, J. (2016). A review of processes behind diversity—Productivity relationships in forests. *Current Forestry Reports*, 2(1), 45–61.
<https://doi.org/10.1007/s40725-016-0031-2>
- Fujii, S., Berg, M. P., & Cornelissen, J. H. C. (2020). Living litter: Dynamic trait spectra predict fauna composition. *Trends in Ecology and Evolution*, 35(10), 886–896.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.05.007>

- Gerhardt, K.** (1996). Effects of root competition and canopy openness on survival and growth of tree seedlings in a tropical seasonal dry forest. *Forest Ecology and Management*, 82(1-3), 33-48.
[https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03700-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03700-4)
- Gommers, C. M. M., Visser, E. J. W., Onge, K. R. S., Voesenek, L. A. C. J., & Pierik, R.** (2013). Shade tolerance: when growing tall is not an option. *Trends in Plant Science*, 18(2), 65-71.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>
- Grime, J. P.** (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 111(982), 1169–1194.
<https://doi.org/10.1086/283244>
- Holl, K. D., & Aide, T. M.** (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558-1563.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Hussain, M. I., González, L., & Reigosa, M. J.** (2011). Allelopathic potential of *Acacia melanoxylon* on the germination and root growth of native species. *Weed Biology and Management*, 11(1), 18–28.
<https://doi.org/10.1111/j.1445-6664.2011.00401.x>
- Barreto Silva, J. S., Ramirez Echeverry, S., Peña Hernández, M. A., Capachero Martínez, C. A., Barbosa Herrera, A. P., Panev, M., Phillips Bernal, J. F., & Moreno Amado, L. M.** (2018). *Manual de campo: inventario forestal nacional Colombia* (Versión 4). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2023/04/Manual_IFN_Colombia_v4.pdf
- Jourgholami, M., Karami, S., Tavankar, F., Lo Monaco, A., & Picchio, R.** (2021). Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests. *Forests*, 12(1), 49.
<https://doi.org/10.3390/F12010049>
- Kremer, K. N., & Bauhus, J.** (2020). Drivers of native species regeneration in the process of restoring natural forests from mono-specific, even-aged tree plantations: a quantitative review. *Restoration Ecology*, 28(5), 1074-1086.
<https://doi.org/10.1111/rec.13247>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F.** (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18.
<https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Liang, W., Feng, Y., Li, F., Zhao, Y., Zhu, J., Yao, J., Chang, C., & Wei, X.** (2023). Drivers of vegetation and soil determine natural regeneration of a single plantation at different slope positions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1167284.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1167284>

- hr/>
- Liang, W., & Wei, X.** (2020). Factors promoting the natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the Lvliang Mountains of central China. *PeerJ*, 8, e9339.
<https://doi.org/10.7717/peerj.9339>
- Lüdecke, D.** (2018). ggeffects: Tidy data frames of marginal effects from regression models. *Journal of Open Source Software*, 3(26), 772.
<https://doi.org/10.21105/joss.00772>
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., Waggoner, P., & Makowski, D.** (2021). performance: An R package for assessment, comparison and testing of statistical models. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3139.
<https://doi.org/10.21105/joss.03139>
- Lugo, A. E.** (1997). The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. *Forest Ecology and Management*, 99(1–2), 9–19.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00191-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00191-6)
- Luo, X., Hou, E., Chen, J., Li, J., Zhang, L., Zang, X., & Wen, D.** (2020). Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China. *CATENA*, 193, 104606.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104606>
- Marian, F., Ramírez Castillo, P., Iñiguez Armijos, C., Günter, S., Maraun, M., & Scheu, S.** (2020). Conversion of Andean montane forests into plantations: Effects on soil characteristics, microorganisms, and microarthropods. *Biotropica*, 52(6), 1142-1154.
<https://doi.org/10.1111/btp.12813>
- Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R., Auge, H., Baeten, L., Barsoum, N., Bruelheide, H., Caldwell, B., Cavender-Bares, J., Dhiedt, E., Eisenhauer, N., Ganade, G., Gravel, D., Guillemot, J., Hall, J. S., Hector, A., Hérault, B., Jactel, H., Koricheva, J., ... Zemp, D. C.** (2022). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters*, 15(1), e12829.
<https://doi.org/10.1111/conl.12829>
- Mondragón, V., Moreno Hurtado, F., & Jaramillo Jaramillo, D. F.** (2022). Soil organic carbon stocks and properties are affected by plant cover types in an urban ecosystem in Colombia. *South African Journal of Plant and Soil*, 39(5), 322-330.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2022.2131009>
- de Oliveira, C. D. C. de, Durigan, G., & Putz, F. E.** (2021). Thinning temporarily stimulates tree regeneration in a restored tropical forest. *Ecological Engineering*, 171, 106390.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106390>
- Palma, A. C., Goosem, M., Fensham, R. J., Goosem, S., Preece, N. D., Stevenson, P. R., & Laurance, S. G. W.** (2021). Dispersal and recruitment limitations in secondary forests. *Journal of Vegetation Science*, 32(1), e12975.
<https://doi.org/10.1111/jvs.12975>

- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P.** (1997). *Mensura forestal*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
<https://hdl.handle.net/11324/15038>
- Puettmann, K. J., Ares, A., Burton, J. I., & Dodson, E. K.** (2016). Forest restoration using variable density thinning: Lessons from Douglas-fir stands in western Oregon. *Forests*, 7(12), 310.
<https://doi.org/10.3390/F7120310>
- R Core Team.** (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
<https://www.R-project.org/>
- Rodríguez González, I. C.** (2022). Investigación de restauración ecológica en bosques Andinos Colombianos: un análisis bibliométrico y vacíos de información. *Actualidades Biológicas*, 44(117), 1–18.
<https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v44n117a02>
- Rojas-B, S. L.** (2017). Estructura y composición florística de la vegetación en proceso de restauración en los Cerros Orientales de Bogotá (Colombia). *Caldasia*, 39(1), 124–139.
<https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.60084>
- Saavedra-Ramírez, K. A., Etter, A., & Ramírez, A.** (2018). Tropical ash (*Fraxinus udhei*) invading Andean forest remnants in Northern South America. *Ecological Processes*, 7, 16.
<https://doi.org/10.1186/s13717-018-0131-y>
- Salamanca, B., & Camargo, G.** (2000). *Protocolo distrital de restauración ecológica: Guía para la restauración de ecosistemas nativos en las áreas rurales de Santa Fe de Bogotá*. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente; Fundación Bachaqueros.
https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlim_download&p=14950
- Simões, L. H. P., Guillemot, J., Ronquim, C. C., Weidlich, E. W. A., Muys, B., Fuza, M. S., Lima, R. A. F., & Brancalion, P. H. S.** (2024). Green deserts, but not always: A global synthesis of native woody species regeneration under tropical tree monocultures. *Global Change Biology*, 30(4), e17269.
<https://doi.org/10.1111/GCB.17269>
- Soil Survey Staff.** (2014). *Kellogg soil survey laboratory methods manual* (Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
https://files.isric.org/public/documents/KelloggSSL_MethodsManual_R42V5_2014.pdf
- Toledo-Aceves, T., López-Barrera, F., Vásquez-Reyes, V., & Günter, S.** (2022). Restoration of tropical montane cloud forest in bracken dominated pastures: The role of nurse shrubs. *Forest Ecology and Management*, 508, 120055.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120055>
- Turnbull, J. W.** (1999). Eucalypt plantations. *New Forests*, 17(1-3), 37-52.
<https://doi.org/10.1023/A:1006524911242>

- Valladares, F., & Niinemets, Ü.** (2008). Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 237-257.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506>
- Verheyen, K., Gillerot, L., Blondeel, H., De Frenne, P., De pauw, K., De pauw, L., Lorer, E., Sanczuk, P., Schreel, J., Van-neste, T., Wei, L., & Landuyt, D.** (2024). Forest canopies as nature-based solutions to mitigate global change effects on people and nature. *Journal of Ecology*, 112(11), 2451-2461.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.14345>
- Walkley, A.** (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils—effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63(4), 251-264.
<https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>
- Wickham, H.** (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis* (2ª ed.). Springer Cham.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Zuur, A. F., & Ieno, E. N.** (2016). A protocol for conducting and presenting results of regression-type analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(6), 636–645.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.12577>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M.** (2009). GLMM and GAMM. En *Mixed effects models and extensions in ecology* (pp. 323-341). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6_13

ANEXOS

Anexo 1. Supervivencia y tasas de incremento periódico anual (IPA) en altura y diámetro de las especies nativas utilizadas en el estudio.

Especie	Supervivencia (%)	IPA Altura (cm. año ⁻¹)	IPA Diámetro (mm. año ⁻¹)
<i>Cedrela montana</i> Moritz ex Turcz	93.7	10.2	2.52
<i>Escallonia paniculata</i> (Ruiz y Pav.) Schult.	30.3	20.3	1.83
<i>Myrcianthes leucoxylo</i> (Ortega) McVaugh	96.3	21.3	1.71
<i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze	97.3	21.0	1.81
<i>Oreopanax incisus</i> (Willd. ex Schult) Decne y Planch.	94.7	16.9	3.10
<i>Retrophyllum rospiglosii</i> (Pilg.) C.N. Page	96.3	8.52	2.52
<i>Viburnum triphyllum</i> Benth.	94.3	19.9	1.49

