

EVALUACIÓN DEL USO DE COMPOST COMO ACONDICIONADOR DEL SUELO EN EL CRECIMIENTO DE CINCO ESPECIES USADAS EN ARBORIZACIÓN URBANA

EVALUATION OF THE USE OF COMPOST AS A SOIL CONDITIONER IN THE GROWTH OF FIVE SPECIES USED IN URBAN ARBORIZATION

Silvia Melissa Manrique Vega¹

¹Estudiante de Biología Ambiental. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. silviam.manriquev@utadeo.edu.co

RESUMEN

La evaluación y el mejoramiento de las características fisicoquímicas del suelo son aspectos clave para garantizar el óptimo desempeño de los árboles en ambientes urbanos. El uso de enmiendas orgánicas, particularmente el compost, ha demostrado ser una estrategia de manejo eficiente para la recuperación de las condiciones degradadas de los suelos urbanos, y además para mejorar el desempeño (establecimiento, crecimiento y longevidad) de los árboles en estos ambientes. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la aplicación del compost en las propiedades fisicoquímicas del suelo, el estado nutricional y el crecimiento de cinco especies nativas utilizadas en programas de arborización urbana por el Jardín Botánico de Bogotá. Mediante un diseño completamente al azar, se evaluaron tres tratamientos: i) tratamiento control (suelo sin enmendar); una mezcla de suelo con compost en relación 3:1 (v/v), y una mezcla de suelo con compost en relación 7:1 (v/v), y cinco especies nativas: *Retrophyllum rospigliosii*, *Inga edulis*, *Citharexylum montanum*, *Caesalpinia spinosa* y *Citharexylum sulcatum*. Los resultados indicaron que, luego de seis meses, las características químicas del suelo fueron positivamente afectadas por la adición de compost: el tratamiento con la mayor proporción de compost (SC 3:1, equivalente a 25%), mostró el mayor incremento en el pH, la Conductividad Eléctrica (CE), la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la Saturación de Bases (BS) del suelo; sin embargo, no se encontró ningún efecto de la adición de compost sobre las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad y humedad volumétrica). También se observó que el contenido de carbono orgánico (CO), el N total, y las concentraciones edáficas, particularmente de P, K, y Ca incrementaron con el tratamiento con la mayor proporción de compost. Por otro lado, el crecimiento de las especies también resultó influenciado por el efecto de la adición de compost al suelo; en general, se obtuvieron mayores promedios de crecimiento en altura y diámetro del tallo con el tratamiento con la menor proporción de compost (SC 7:1, equivalente a 12,5 %). El crecimiento promedio en el número de hojas de las especies fue mayor con el tratamiento SC 3:1. Estos resultados indican que los efectos positivos del compost en las propiedades químicas del suelo y en el crecimiento de las especies se pueden evidenciar en un

periodo de tiempo menor a un año, y además sugieren que el uso de este compost como enmienda del suelo podría ser una opción viable para el acondicionamiento de los sitios de plantación y el mejoramiento del establecimiento de especies nativas potencialmente utilizadas en los programas de arborización de la ciudad.

Palabras clave: Suelos urbanos, Compost, Propiedades fisicoquímicas, Crecimiento, Especies nativas.

ABSTRACT

Assessment and improvement of the physicochemical characteristics of the soil are key aspects to guarantee the optimal performance of trees in urban environments. The use of organic amendments, particularly compost, has proven to be an efficient management strategy for the recovery of degraded conditions of urban soils, and also to improve the performance (establishment, growth and longevity) of trees in these environments. The objective of this study was to evaluate the effects of the application of compost on the physicochemical properties of the soil, the nutritional status and the growth of five native species used in urban arborization programs by the Botanical Garden of Bogotá. Using a completely randomized design, three treatments were evaluated: i) control treatment (soil without amendment); a mixture of soil with compost in a ratio of 3: 1 (v / v), and a mixture of soil with compost in a ratio of 7: 1 (v / v), and five native species *Retrophyllum rospigliosii*, *Inga edulis*, *Citharexylum montanum*, *Caesalpinia spinosa* y *Citharexylum sulcatum*. The results indicated that, after six months, the chemical characteristics of the soil were positively affected by the addition of compost: the treatment with the highest proportion of compost (SC 3: 1, equivalent to 25%), showed the greatest increase in the pH, Electrical Conductivity (EC), Cationic Exchange Capacity (CEC) and Basis Saturation (BS) of the soil; however, no effect of the addition of compost on the physical properties (bulk density, porosity and volumetric moisture) was found. It was also observed that organic carbon content (CO), total N, and edaphic concentrations, particularly of P, K, and Ca increased with the treatment with the highest proportion of compost. On the other hand, the growth of the species was also influenced by the effect of the addition of compost to the soil; in general, higher growth averages were obtained in height and diameter of the stem with the treatment with the lowest proportion of compost (SC 7: 1, equivalent to 12.5%). The average growth in the number of leaves of the species was greater with the SC 3: 1 treatment. These results indicate that the positive effects of compost on the chemical properties of the soil and on the growth of the species can be evidenced in a period of time less than a year, and also suggest that the use of this compost as a soil amendment could be a viable option for the conditioning of the plantation sites and the improvement of the establishment of native species potentially used in the tree-planting programs of the city.

Key words: Urban soils, Compost, Physicochemical properties, Growth, Native tree species.

INTRODUCCIÓN

Un aspecto clave de la silvicultura urbana es garantizar la supervivencia de los árboles que se producen, la cual está fuertemente influenciada por las técnicas de manejo que se emplean, bien sea en la etapa de vivero o en la adecuación del sitio de plantación. Dentro de estas técnicas, la calidad del suelo es uno de los factores que determina el establecimiento exitoso de la vegetación en ambientes urbanos (Alvarado *et al.*, 2014). Además de proporcionar soporte y estabilidad física, el suelo es el medio que tiene la finalidad de suministrar humedad, agua y nutrientes minerales, así como permitir el intercambio de gases desde y hacia el sistema radicular de las plantas (Moreno y Hoyos, 2015). Scharenbroch y Catania (2012) indican que el contenido de materia orgánica, el pH y la textura del suelo parecen ser los factores principales para determinar la calidad del suelo y por tanto del desempeño de los árboles urbanos. Desafortunadamente, en la preparación de los sustratos no se le da mucha relevancia a algunas de las características que el suelo debe tener para satisfacer las necesidades mínimas de crecimiento de las plantas (Moreno y Hoyos, 2015).

Este panorama es aún más crítico puesto que la mayoría de veces no se tiene en cuenta el desajuste fisiológico que ocurre en la planta durante el proceso de plantación, incluso aun cuando éste se realiza correctamente. De acuerdo con Alvarado *et al.* (2014), las pérdidas de masa radicular, el desecamiento e insolación de las raíces, la inadecuada posición en la colocación, las heridas mecánicas, el contacto insuficiente de las raíces con el suelo, la falta de riego, y el descalce (retirada de la tierra de la base de una planta), son algunas de las múltiples y eventualmente concurrentes causas que afectan el desarrollo de las plantas durante los primeros años de su establecimiento. Otros factores como el estrés térmico, reforzado por las islas de calor, y el estrés hídrico, derivado de la impermeabilidad de los suelos por la infraestructura, favorecen el desbalance fisiológico, incrementan la susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades, y finalmente producen la muerte de los árboles en áreas urbanas (Cregg y Dix, 2001).

En este contexto, la adición de enmiendas orgánicas se considera una opción viable para mantener y recuperar la calidad del suelo, así como para promover el establecimiento de la vegetación en áreas urbanas (Scharenbroch y Catania, 2012). Esto, debido a su gran potencial para mejorar las condiciones de crecimiento y aumentar la longevidad de árboles y arbustos que a menudo son plantados en suelos pobres en materia orgánica y nutrientes, y que además se encuentran rodeados de superficies que dificultan el transporte de agua y al oxígeno (Sæbø y Ferrini, 2006). El uso de estos productos sobre suelos degradados por el desarrollo urbano contribuye a controlar los problemas de erosión, reducir la evaporación, incrementar la percolación, aumentar el almacenamiento de agua, y promover la liberación de nutrientes. Estas condiciones ayudan a proporcionar un ambiente que promueve el crecimiento de un sistema de raíces sano para las plantas, y en definitiva aceleran su establecimiento en dichos ambientes (Cogger, 2005; Sæbø y Ferrini, 2006; Al-Bataina *et al.*, 2016). El compost es uno de los materiales orgánicos más

utilizados en ambientes urbanos dado que se ha encontrado que impacta positivamente las propiedades del suelo y el crecimiento de los árboles. Por ejemplo, Scharenbroch y Watson (2014) demostraron que el compost, además de ser una alternativa efectiva y de bajo costo en relación a los fertilizantes inorgánicos, mejora la calidad del suelo e incrementa el crecimiento de *Acer rubrum* y *Betula nigra* en suelos urbanos compactados.

Otro aspecto importante del cual depende el éxito del establecimiento de los individuos que conforman el bosque urbano es la selección de especies, la cual tiene en cuenta características relacionadas con la adaptabilidad al sitio de plantación, la función, el manejo y algunos aspectos estéticos (Ferrini y Fini, 2011). Con el ánimo de fortalecer la identidad y la funcionalidad ecológica del paisaje urbano, en Colombia se ha promovido el uso de especies nativas dentro de los programas de arborización de las principales ciudades, fijando como prioridad la conformación y el restablecimiento de corredores ecológicos continuos que interactúen con los ecosistemas locales y su biodiversidad (Acosta-Hernández, 2014; Moreno y Hoyos, 2015). De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta todos los beneficios que éstas ofrecen (Uribe, 1997; Molina, 2008;), se esperaría que las especies nativas fuesen un elemento común en la mayoría de las áreas verdes urbanas. No obstante, la selección de especies para dichos espacios aún está orientada hacia las especies exóticas, las cuales superan en gran proporción a los árboles nativos, tanto en número de especies como en abundancia de individuos (Acosta-Hernández, 2014; Tovar, 2016). Desafortunadamente, el panorama anterior no diverge mucho de las condiciones de la ciudad de Bogotá, la cual, además de presentar sitios de emplazamiento inadecuados, se caracteriza por poseer una arborización madura, con un alto porcentaje de especies foráneas, densidades excesivas y con bajo vigor (Tovar, 2007).

Pese a que en los últimos años se han realizado esfuerzos para plantar especies nativas en las zonas verdes urbanas del país (Álvarez *et al.*, 2011; Moreno y Hoyos, 2015), se conoce muy poco sobre los requerimientos edáficos que pueden favorecer el establecimiento y adaptación de los árboles en dichos ambientes. Adicionalmente, hasta el momento no se han llevado a cabo estudios locales que prueben el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas como el compost, en el establecimiento de especies nativas en áreas urbanas. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del compost incorporado al suelo sobre el crecimiento de cinco especies nativas utilizadas en programas de arborización urbana ejecutados por el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se llevó a cabo entre los meses de agosto de 2017 y febrero de 2018, en las instalaciones del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, ubicado en el municipio de Chía, Cundinamarca (4° 53' 06" N y 74° 00' 48,1" W). El

ensayo se estableció bajo condiciones de invernadero, el cual presentó una temperatura promedio de 15°C y una humedad relativa de 84,5%.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y preparación de sustratos

Se evaluó el efecto de las mezclas de compost en el crecimiento de cinco especies nativas utilizadas en silvicultura urbana de la ciudad de Bogotá: *Retrophyllum rospigliosii* (pino romerón), *Inga edulis* (guamo santafereño), *Citharexylum montanum* (cajeto), *Caesalpinia spinosa* (dividivi) y *Citharexylum sulcatum* (cajeto de páramo). Para el ensayo se utilizaron árboles entre los 12-15 meses de edad con una altura aproximada de 120 cm.

Para la preparación de los sustratos a evaluar, se utilizó compost elaborado a partir de material orgánico (residuos de plazas de mercado y de cortes de cultivos de rosas) inoculado con microorganismos benéficos, proveído por la empresa Terra Viva Ltda. El suelo con el que se realizan las actividades de producción en el vivero La Florida del Jardín Botánico de Bogotá (JBB) José Celestino Mutis, consiste en una mezcla de tierra negra fértil enriquecida con material tipo cascarilla de arroz en proporción 8:1 (Álvarez, 2011); esta mezcla se denominó como suelo y fue aplicada previamente a la preparación de los demás sustratos. El material vegetal del estudio, la tierra y la cascarilla de arroz fueron proporcionados por el vivero La Florida del JBB.

Al suelo y al compost se les realizó un análisis fisicoquímico y reveló los siguientes resultados:

Suelo: textura franca (Bouyocus) 45.5% arena, 43.3% Limo, 9.1% Arcilla; pH (agua 1:1) 6.1; Carbono orgánico (calcinación) 3.13%; bases de intercambio (acetato de amonio 1:20) K 245 mg*kg⁻¹, Ca 2956 mg* kg⁻¹, Mg 397 mg* kg⁻¹, Na 75 mg* kg⁻¹; P (Bray II) 48.2 mg* kg⁻¹; elementos menores (DTPA 1:2) Fe 123.9 mg* kg⁻¹, Mn 6.0 mg* kg⁻¹, Cu 1.53 mg* kg⁻¹, Zn 2.43 mg* kg⁻¹; B (extracto de saturación) 0.15 mg* kg⁻¹; N mineral (KCL 1N-Kjeldahl) 10.6 mg* kg⁻¹; conductividad eléctrica 0.54 dS/m; capacidad de intercambio catiónico (CIC) 39.1 cmol+* kg⁻¹.

Compost comercial: pH (extracto de saturación) 6.9; Carbono orgánico (calcinación) 9.94%; K 0.31%, Ca 9.50%; Mg 0.32 %, Na 0.21%; P (Bray II) 0.30%; elementos menores (DTPA 1:2) Fe 7485 mg* kg⁻¹, Mn 119 mg* kg⁻¹, Cu 9.9 mg* kg⁻¹, Zn 47.9 mg* kg⁻¹; B (extracto de saturación) 24.8 mg* kg⁻¹; N total (KCL 1N-Kjeldahl) 0.94%; conductividad eléctrica (extracto de saturación) 2.0 dS m⁻¹; capacidad de intercambio catiónico (CIC) 35.2 cmol+* kg⁻¹; densidad aparente 0.84 g*cm⁻³; relación C/N 10.54.

Diseño experimental

Para determinar el efecto del compost en el crecimiento de los árboles, se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con cinco repeticiones por tratamiento, y un individuo de cada especie por repetición. Los tratamientos evaluados fueron: i) un tratamiento control (Suelo); (ii) mezcla de suelo con compost relación 3:1 (v/v) (SC 3:1), equivalente a 25% de compost; y (iii) mezcla de suelo y compost en relación 7:1 (v/v) (SC 7:1) equivalente a 12.5% de compost. Las mezclas de los sustratos se realizaron de acuerdo con Cogger (2005) y Sæbø y Ferrini (2006). Se dispuso de un total de 75 árboles (15 por cada especie). Previo a la siembra, se podaron las raíces en estado de malformación de cada uno de los individuos con el fin de evitar limitaciones en su crecimiento. Posteriormente, los árboles se sembraron en bolsas negras plásticas de 60 L, y se llenaron con la mezcla de sustrato correspondiente hasta su capacidad máxima, evitando dejar espacios de aire entre el suelo y las paredes de la bolsa. Los árboles se mantuvieron en condiciones de invernadero, y separados uno del otro 1,5 m, ocupando un área rectangular de 216 m².

Medición de los parámetros de crecimiento

El crecimiento de todos los individuos fue determinado midiendo, una vez por mes, durante seis meses, las siguientes características: (i) Altura total (cm): con una cinta métrica, se tomó el valor desde la marca del cuello de la raíz hasta la yema apical, descontando las ramas excepcionales o estructuras reproductivas. (ii) Diámetro del cuello de la raíz (cm): se registró el valor del diámetro con un calibrador digital ubicándolo siempre en el mismo sentido. (iii) Número de hojas: el conteo de hojas o estructuras foliares se realizó teniendo en cuenta la morfología de cada especie. Así pues, en especies como el cajeto (*Citharexylum subflavescens*) y el cajeto de páramo (*Citharexylum sulcatum*), se contaron manualmente las hojas simples. Por otro lado, en el caso del guamo (*Inga edulis*) y el dividivi (*Caesalpinia spinosa*), el conteo se efectuó a nivel de foliolos. En el pino romerón (*Retrophyllum rospigliosii*), se contaron las estructuras laterales conformadas por hileras de hojas simples. Se contaron como hojas/foliolos las estructuras totalmente expandidas. (iv) Contenido foliar de clorofila (CCI): utilizando un clorofilometro MC 100 (Apogee Instruments, United Kindom), se midió la concentración de clorofila de cada individuo. Para ello, se tomaron 3 hojas completamente desarrolladas por árbol y se determinó el promedio de la concentración tomando 4 medidas por hoja. La medición se realizó en la parte media de la lámina foliar. Este procedimiento se realizó para todas las especies, excepto para el pino romerón.

Con los datos mencionados anteriormente se crearon nuevas variables correspondientes a la ganancia mensual en altura (cm mes⁻¹), ganancia mensual en el diámetro del tallo (cm mes⁻¹), y ganancia mensual en el número de hojas de cada individuo. Para ello, se calculó la pendiente (*b*) de cada uno de los tres primeros parámetros de crecimiento, de acuerdo con la ecuación de regresión simple $y' = a + bx$. Posteriormente, se obtuvo una matriz con los valores promedio de las pendientes de la ganancia mensual en altura, diámetro y número de hojas acuerdo a la especie y a los tratamientos evaluados. La concentración

de clorofila foliar fue obtenida a partir del promedio de las medianas de crecimiento según la especie y según el tratamiento. Dichos procedimientos se llevaron a cabo a través del programa Microsoft Office Excel® Versión 2010.

Caracterización fisicoquímica del suelo

En el último mes del muestreo en campo (Febrero), se determinó la porosidad, el contenido volumétrico de agua, y la densidad aparente (ρ_b) de los sustratos, usando las relaciones volumétricas del suelo mediante el método propuesto por Arshad, *et al.* (1996) (Tabla 1). Se asumió como densidad real del suelo un valor equivalente a 2.6 g cm⁻³ (Kalra, 1998).

Tabla 1. Fórmulas matemáticas empleadas para el cálculo de las propiedades físicas de los sustratos.

Densidad aparente (g cm ⁻³)	Humedad Volumetrica (%)	Porosidad (%)
$\rho_b = \frac{M_s}{V_t}$	$\% = \frac{V_w}{V_t} \times 100$	$\% = \frac{V_v}{V_t}$ $V_v: V_t - V_s$
Donde: Ms: Masa de suelo seco. Vt: volumen del cilindro. Vw: Volumen ocupado por el agua. Vv: Volumen de vacios (Volumen ocupado agua + volumen ocupado por el aire) Vs: Volumen del suelo.		

Por otro lado, los análisis químicos del suelo se realizaron de acuerdo con los métodos oficiales de Zamudio *et al.*, (2006). Se determinó el pH del suelo por el método del potenciómetro; el contenido de carbono orgánico por el método de Wakley y Black (% p/v) (1934); la acidez intercambiable por extracción con cloruro de potasio (KCL 1N) y cuantificación por volumetría; la capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) por extracción neutral con acetato de amonio (NH₄Ac 1N) y cuantificación por emisión-absorción atómica; el fósforo total (P) por mezcla en nitrato de potasio-nitrato de sodio y cuantificación por espectrofotometría en el rango visible.

Determinación de la concentración foliar de nutrientes

Para determinar la concentración de macro y micronutrientes en las hojas, en el último mes del estudio, se colectó una muestra representativa de hojas, completamente expandidas y de edad similar, del tercio medio de la planta. Se colectaron hojas de tres plantas para cada especie según la repetición. Las muestras se secaron en un horno a 70°C hasta peso constante. El N total fue determinado de acuerdo al método de Kjeldhal, con una alícuota de 25 ml de extracto puro, seguido por destilación y valoración. Las concentraciones de fósforo y boro fueron determinadas por colorimetría. Los macronutrientes (Ca, Mg, y K) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn) fueron determinados

por espectrofotometría de absorción atómica. El contenido de azufre fue determinado por turbidimetría.

Análisis estadístico

Los datos de las propiedades fisicoquímicas del suelo, la concentración de nutrientes a nivel edáfico, y la concentración de nutrientes a nivel foliar de cada especie fueron analizados a partir de un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, considerando como factores el sustrato de siembra y la especie. Al no cumplir los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad de varianza (Levene), se ejecutaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis para determinar las diferencias en cada uno de los apartados mencionados anteriormente. Se realizaron pruebas de comparación múltiple con la corrección de Bonferroni de acuerdo con McDonald (2009). Se aceptaron diferencias estadísticas con un valor de significancia \leq a 0.05.

Se utilizó un ANOVA de dos vías con el fin de determinar los efectos de la adición de compost, la especie y su interacción sobre la ganancia mensual en altura, diámetro del tallo, y número de hojas, y concentración foliar de clorofila (Zar, 2010). Las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene se utilizaron para comprobar la normalidad de la distribución y la homogeneidad de las varianzas, respectivamente. A las variables que no cumplieron el supuesto de normalidad, (número de hojas y concentración foliar de clorofila) se les aplicó la transformación logarítmica (Log 10). Las diferencias entre los tratamientos y entre las especies fueron determinadas utilizando la prueba *post hoc* de Tukey HSD con $P < 0.05$. Las pruebas estadísticas fueron llevadas a cabo con el programa R versión 3.3.1 (R Core Team, 2013).

RESULTADOS

Efecto de los tratamientos en las propiedades fisicoquímicas del suelo

Se encontraron diferencias significativas en las características químicas del suelo entre los niveles del factor tratamiento ($p \leq 0.05$). En comparación con el suelo sin enmendar, los tratamientos a los cuales se les adicionó compost, incrementaron el pH del suelo hasta un valor máximo de 7.8, equivalente a un aumento de 23% (Tabla 2); no se encontraron diferencias estadísticas del pH entre los dos suelos enmendados con compost ($p > 0.05$).

Por otro lado, se observó que la proporción de compost incorporado al suelo afectó proporcionalmente la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico efectiva y el porcentaje de saturación de bases. Para estos parámetros, los valores más altos se obtuvieron con el tratamiento con 25% de compost (SC 3:1), seguidos de aquellos obtenidos con el tratamiento con 12,5% de compost (SC 7:1), y los valores más bajos se obtuvieron con el suelo sin enmendar. De igual forma, el porcentaje de carbono orgánico aumentó significativamente de acuerdo a la proporción de compost aplicado.

Con el tratamiento SC 7:1, el incremento fue de 17%, mientras que con el tratamiento SC 3:1 fue de 31% respecto al tratamiento sin enmienda (Tabla 2). Los tratamientos con adición de compost no mostraron incrementos significativos en el contenido de materia orgánica respecto al tratamiento sin enmendar ($p > 0.05$).

En contraste con los resultados descritos anteriormente, ninguno de los dos factores entre el tratamiento y la especie, al igual que su interacción, mostraron efectos significativos entre las propiedades físicas del suelo. Contrario a lo esperado, no se encontraron diferencias entre los valores medios de la porosidad, la densidad aparente y la humedad volumétrica debido a la adición de compost al suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de los tratamientos en las características físicas y químicas del suelo.

	Tratamiento								
	HV (%)	DA (g cm ⁻³)	P (%)	pH	CE (dS m ⁻¹)	PS (%)	MO (%)	CO (%)	CICe (cmol + kg ⁻¹)
Suelo	36.8 ± 4.7 a	0.84 ± 0.07a	67.9 ± 2.9 a	6.3 ± 0.2 b	0.21 ± 0.03 b	78.1 ± 7.1 b	5.0 ± 9.1 a	2.9 ± 0.8 b	16.9 ± 2.6 b
Suelo-Compost 3:1	36.8 ± 5.9 a	0.87 ± 0.09 a	66.6 ± 3.6 a	7.8 ± 0.1 a	0.47 ± 0.22 a	85.5 ± 6.6 a	5.5 ± 1.6 a	3.8 ± 0.9 a	32.6 ± 10.8 a
Suelo-Compost 7:1	35.4 ± 5.4 a	0.85 ± 0.03 a	67.2 ± 2.6 a	7.8 ± 0.3 a	0.44 ± 0.06 a	83.7 ± 4.2 ab	5.8 ± 1.1 a	3.4 ± 0.6 ab	30.9 ± 4.2 a
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Significancia	Especie*Tratamiento								
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Los resultados de cada tratamiento se expresan como mediana y rango intercuartil (25-75%). Medianas seguidas por la misma letra dentro de una columna no son significativamente diferentes ($p < 0.05$, prueba de Kruskal- Wallis); $n = 45$. NS representa diferencias no significativas. HV: Humedad Volumétrica. DA: Densidad Aparente. P: Porosidad. CE: Conductividad eléctrica. PS: Porcentaje de saturación de bases. MO: Materia orgánica. CO: Carbono orgánico. CICe: Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva.

Efecto de los tratamientos en el contenido de nutrientes en los sustratos

En general, los tratamientos enmendados con compost tuvieron una mayor concentración edáfica de macronutrientes respecto al control (Tabla 3). El contenido de N total, P, K, Ca y Mg, aumentó en 35%, 96%, 103%, 111% y 6%, respectivamente, con el tratamiento con la mayor proporción de compost (SC 3:1), en comparación con la concentración de éstos en el tratamiento sin enmendar. Cabe anotar que aunque la concentración de N y Mg fue

mayor en el tratamiento control (26.8 y 481 ppm respectivamente) que en el tratamiento SC 7:1 (18,4 y 467 ppm respectivamente), esta diferencia no fue significativa ($p > 0.05$).

De las fuentes de nitrógeno evaluadas, la concentración de NO_3 incrementó 88% con el tratamiento SC 3:1, frente al tratamiento control. En contraste, no se encontraron diferencias significativas en la concentración de amonio (NH_4) entre los sustratos ($p > 0.05$).

En cuanto a la concentración de micronutrientes, los valores más altos de Fe y Mn se obtuvieron con el tratamiento control (Suelo) (121.7 y 5.2 ppm respectivamente), mientras que la concentración de Zn y B fue mayor en el tratamiento SC 3:1 (7.6 y 0.6 ppm respectivamente). Con este último tratamiento, la relación entre Ca/Mg aumentó 88%, mientras que la relación Mg/K disminuyó significativamente 53% respecto al control.

Tabla 3. Efecto de los tratamientos en la concentración de nutrientes en el suelo.

	N- NH 4	N- NO 3	N- Min	P	K	Ca	Mg	Na	S	Fe	Mn	Zn	B
Tratamiento													
Suelo	12.	8.7	26.	58.1	465.	2392.	481.	48.0	5.7	121.	5.2	3.1	0.2
	6 ±	±	8 ±	±	0 ±	0 ±	0 ±	±	±	7 ±	±	±1	±
	11.	7.5	21.	13.1	93.0	569.0	71.0	19.0	3.2	65.8	0.7	b	0.1
	7 a	b	1 b	b	b	b	ab	b	b	a	a		b
Suelo - Comp ost 3:1	17.	16.	36.	114.	943.	5050.	510.	229.	15.	97.6	3.1	7.6	0.6
	5 ±	4 ±	3 ±	1 ±	0 ±	0 ±	0 ±	0 ±	0 ±	±	±	±	±
	19.	13.	24.	36.5	209.	2038.	37.0	227.	10.	28.8	1.1	2.3	0.2
	3 a	0 a	5 a	a	0 a	0 a	a	0 a	3 a	ab	ab	a	a
Suelo - Comp ost 7:1	7.4	9.7	18.	106.	896.	4781.	467.	180.	10.	74.3	3.0	7.5	0.1
	±	±	4 ±	0 ±	0 ±	0 ±	0 ±	0 ±	8 ±	±	±	±	±
	5.4	2.5	17.	21.0	160.	895.0	69.0	128.	2.3	19.2	0.3	2.8	0.2
	a	ab	0 b	ab	0 ab	ab	b	0 ab	ab	b	b	ab	b
Especie													
Signif icanci a	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Especie* Tratamiento													
Signif icanci a	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Los resultados se expresan como mediana y rango intercuartil (25-75%), siendo significativos aquellos valores seguidos por letras diferentes según la prueba post hoc de Kruskal- Wallis ($p < 0.05$); $n = 45$. NS representa diferencias no significativas. La concentración de cada nutriente está expresada en mg kg^{-1} .

Concentración foliar de nutrientes de las especies evaluadas

Contrario a lo que se esperaba, el aumento en la concentración de nutrientes que generó la adición de compost a los sustratos de siembra, no mostró ningún efecto en la concentración foliar de nutrientes en las especies ($p < 0.05$). En consecuencia, las diferencias en la concentración foliar de nutrientes se explicaron por el efecto individual de las especies. El análisis de nutrientes mostró que para las cinco especies, la concentración foliar de cationes varió entre 0.14 y 0.19 % para P; 0.9 y 1.1% para K; 1.7 y 0.7 para Ca; y 0.13 y 0,35% para Mg (Tabla 4). La concentración foliar de N fue significativamente mayor en *I. edulis*. Esta especie contuvo cerca de 63 y 73 % más N que *R. rospiglosii* y *C. spinosa* respectivamente, y 85% más para ambos *C.sulcatum* y *C. subflavescens*. La mayor concentración de Na foliar se encontró en *Retrophyllum rospiglosii*. La mayor concentración foliar de Ca, Mg y micronutrientes, excepto de B, se encontró en *C. subflavescens*; y la menor de éstos en *C. spinosa*. Las concentraciones de P y K no mostraron diferencias significativas para ninguna de las especies.

Tabla 4. Diferencias en el contenido foliar de macro (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Mn, Cu, Zn y B) en las especies evaluadas luego de seis meses de plantación.

		Especie										
		N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Mn	Cu	Zn	B
<i>R. rospiglosii</i>		1.6	0.14±	1.1±	1.5	0.29 ±	0.08±	0.035±	51.8±		17.2	27.3±
		±	0.08	0.2	±	0.11	0.03	0.09	92.8	12.7±	±	12.2
		0.2	a	a	0.6	ab	bc	a	ab	4.5 a	3.0	a
<i>I. edulis</i>		2.6	0.17±	0.9±	0.7±	0.15	0.11±	0.008±	52.3±		32.4±	32.4±
		±	0.25	0.2	0.7	±0.75c	0.02	0.03	33.8	6.8±	13.6	13.2
		0.4a	a	a	bc		ab	bc	a	2.2 b	b	a
<i>C. sulcatum</i>		1.4	0.19±	1.0	1.1±	0.21±	0.08±	0.007±	22.6±		62.7±	45.7±
		±	0.04	±	0.8	0.11abc	0.03	0.07 c	20.7	11.9±	36.8	32.5a
		0.4b	a	a	abc		abc		ab	6.2 a	a	
<i>C. spinosa</i>		1.5±	0.17±	0.9±	0.7±	0.13±	0.06±	0.007±	17.0±		16.2±	10.7±
		0.3	0.05	0.2	0.3	0.07 c	0.15	0.08	14.2	4.90±	5.4 c	4.7 b
		b	a	a	c		c	bc	b	2.4 b		
<i>C. subflavescens</i>		1.4±	0.19	0.9	1.7±	0.35±	0.13±	0.007±	29.2±	12.9±	62.1±	50.6±
		0.3	±0.04	±	0.6	0.15 a	0.65	0.05	8.3 a	8.15	39.9	11.3
		b	a	a	a		a	bc		a	a	a
Significancia		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Significancia		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Los resultados se expresan como mediana y rango intercuartil (25-75%), siendo significativos aquellos valores seguidos por letras diferentes según la prueba de Kruskal- Wallis ($p < 0.05$); $n = 45$. NS representa diferencias no significativas. Los valores de los macro y nutrientes se expresan en % mg kg⁻¹.

Efecto de los tratamientos en las características de crecimiento de las especies

En general, la adición de compost al sustrato de siembra tuvo un efecto significativo en todos los parámetros de crecimiento de los árboles. La ganancia mensual de crecimiento en altura total, diámetro del tallo, número de hojas y concentración foliar de clorofila fueron mayores con al menos uno de los tratamientos con compost en comparación con el tratamiento control (Tabla 5). Las interacciones observadas entre los tratamientos y las especies evaluadas, indican que el efecto de los tratamientos sobre el incremento en los parámetros de crecimiento fue significativamente diferente entre las especies (Tabla 5).

Tabla 5. Efecto del tratamiento, la especie y su interacción (Tratamiento*Especie) en los parámetros de crecimiento de los árboles.

Parámetro/ Fuente de variación	Ganancia en altura (cm mes ⁻¹)	Ganancia en diámetro del tallo (cm mes ⁻¹)	Concentración de clorofila (CCI)
Tratamiento			
Suelo	2,57 b	0,07 b	39,52 b
Suelo-Compost 3:1	2,84 ab	0,13 b	44,95 a
Suelo-Compost 7:1	3,67 a	0,15 a	55,13 a
Significancia	*	**	**
Especie			
<i>R. rospigliosii</i>	3,2	0,10 ab	NA
<i>I. edulis</i>	3,1	0,10 ab	75,98 a
<i>C. sulcatum</i>	2,74	0,16 a	21,84 d
<i>C. spinosa</i>	3,62	0,08 b	48,61 b
<i>C. subflavescens</i>	2,45	0,13 a	31,10 c
Significancia	NS	**	**
Especie*Tratamiento			
Significancia	NS	*	*

Los valores representan las medias (de cinco réplicas) de los parámetros de crecimiento asociadas a cada factor. En cada columna, medias seguidas por letras diferentes representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). NS muestran diferencias no significativas. ** $P < 0.001$; * $P < 0.05$.

La aplicación de compost al sustrato de siembra incrementó la ganancia mensual en altura de los árboles. Dicho aumento fue mayor con el tratamiento con la menor proporción de compost (SC 7:1) y equivalió al 42% (Tabla 5). Este efecto se presentó en todas las especies, excepto en *C. subflavescens*, cuya ganancia mensual fue casi la misma con el tratamiento sin enmendar (2,5 cm mes⁻¹), que con los tratamientos enmendados (2,4 cm mes⁻¹ en promedio). La ganancia mensual en altura fue

estadísticamente igual entre las especies ($F(4,60)=2.27$, $p=0.07$, $\eta^2=0.13$) y mostró el siguiente orden: *C. spinosa* > *R. rospiglosii* > *I. edulis* > *C. sulcatum* > *C. subflavescens* (Tabla 5).

Por otro lado, la ganancia mensual en el diámetro del tallo y el número de hojas estuvo significativamente influenciada por el tratamiento, la especie y la interacción entre ambos factores. Se observaron ganancias similares en el diámetro del tallo y el número de hojas entre los sustratos con adición de compost, y además, significativamente mayores que con el sustrato sin enmendar. Mientras que la ganancia mensual en el diámetro del tallo fue mejor con el tratamiento SC 7:1 (Figura 1), la ganancia mensual en el número de hojas no mostró diferencias entre ambos tratamientos enmendados, pero fue significativamente mayor con éstos (Figura 2).

La ganancia mensual promedio del diámetro fue significativamente mayor en *C. sulcatum* y *C. subflavescens* (0.16 y 0.13 cm respectivamente), seguidas de *I. edulis* y *R. rospiglosii*, las cuales registraron el mismo valor (0,10 cm), mientras que *C. spinosa*, obtuvo el promedio más bajo (0,08 cm). La interacción entre ambos factores mostró que la aplicación de compost incrementó significativamente el crecimiento mensual en el diámetro del tallo de las especies del género *Citharexylum*; por una parte, el incremento en el crecimiento del tallo en *C. sulcatum* con ambos tratamientos con compost fue mayor, en comparación con el crecimiento de este parámetro en las demás especies con el tratamiento sin enmendar; para esta especie, la ganancia mensual en el diámetro fue del triple con el tratamiento SC 7:1, y más del doble con el tratamiento SC 3:1 (0,19 cm), en comparación con el con el tratamiento sin enmendar (0,07 cm). Se observó una tendencia similar en *C. subflavescens*, la cual mostró un incremento en el diámetro del tallo de más del doble con el tratamiento SC 7:1 en comparación con el crecimiento de las demás especies con el suelo sin enmendar. Por último, el crecimiento del diámetro de *C. sulcatum* con cualquiera de los tratamientos enmendados fue mayor que el crecimiento del diámetro de *C. spinosa* en las mismas condiciones.

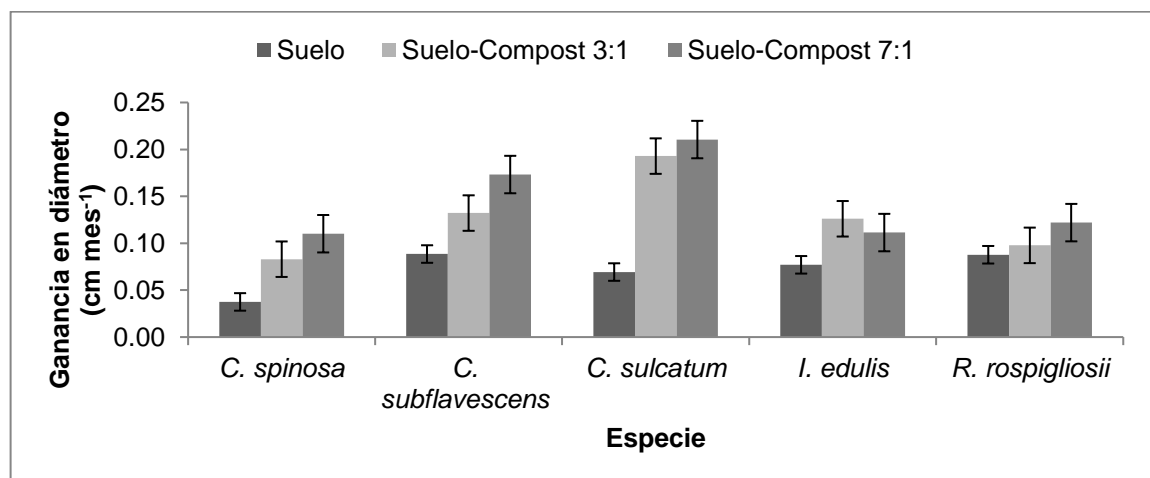


Figura 1. Efecto de los sustratos en la ganancia mensual en el diámetro del tallo. Las columnas representan el promedio de la pendiente del diámetro de cada especie para cada uno de los tratamientos. Las líneas verticales representan el error estándar (n=75).

Por otra parte, la interacción entre el tratamiento y la especie en la ganancia mensual del número de hojas, mostró que, a diferencia de las demás especies creciendo en suelos sin enmendar, este parámetro en *C. spinosa* incrementó con la adición de cualquiera de los dos tratamientos con compost. Al igual que la ganancia en el diámetro, el efecto entre ambos factores reveló que la ganancia mensual en el número de hojas en *C. sulcatum* aumentó casi doce veces con el tratamiento SC 3:1, y casi nueve veces con el tratamiento SC 7:1 (34 y 26 hojas respectivamente), en contraste con el tratamiento sin enmendar (3 hojas) (Figura 2).

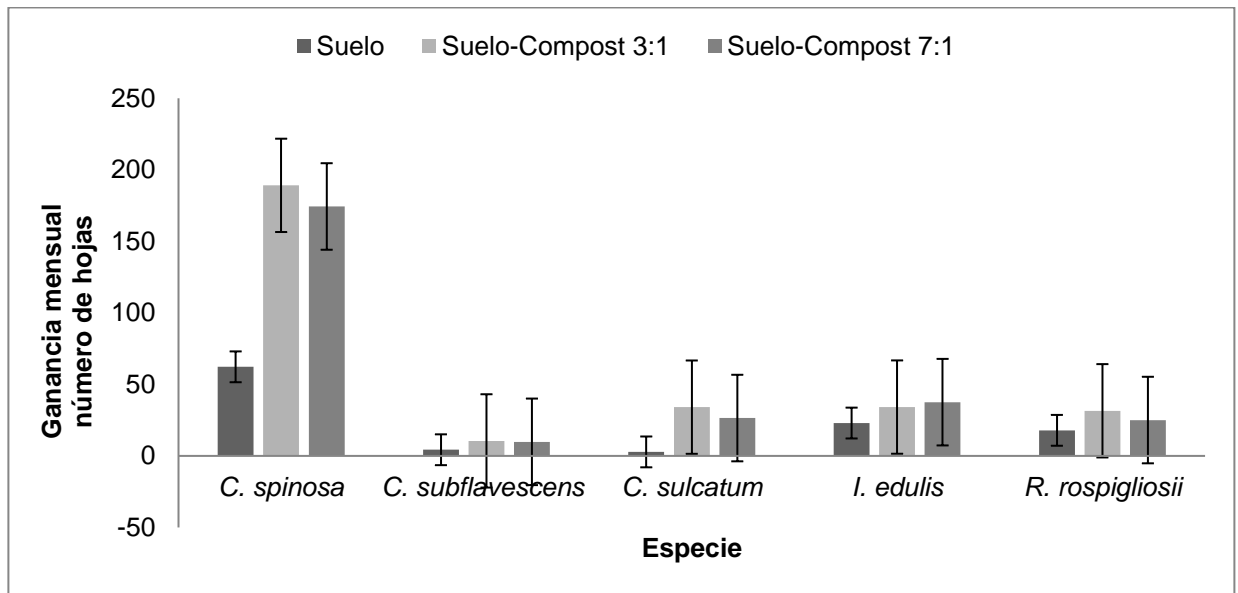


Figura 2. Efecto de los sustratos en el crecimiento mensual en el número de hojas. Las columnas representan el promedio de la pendiente del número de hojas/foliolos de cada especie para cada uno de los tratamientos. Las líneas verticales representan el error estándar (n=75).

La aplicación de compost a los sustratos de siembra también mostró un efecto en la concentración foliar de clorofila de las especies, $F(3,48)=56.7$, $p<0.01$, $\eta^2=0.77$. Se obtuvieron valores significativamente mayores con el tratamiento suelo SC 7:1, en relación con el tratamiento sin ninguna enmienda (Figura 3). La concentración relativa de clorofila también mostró diferencias entre las especies (Tabla 5), siendo ésta significativamente mayor para *I. edulis* (75.9 CCI), seguida de *C. spinosa* y *C. sulcatum* (48.6 y 31.1 CCI respectivamente). *C. subflavescens* mostró la concentración relativa de clorofila más baja (21.8 CCI). Aunque se encontró que la interacción entre ambos factores fue significativa, ésta no mostró ninguna tendencia clara.

El crecimiento de las especies evaluadas puede resumirse así: las especies del género *Citharexylum* presentaron las mayores tasas de crecimiento en diámetro, pero las menores tasas mensuales de crecimiento en altura, y número de hojas, así como también la menor concentración foliar de clorofila en comparación con las otras especies; por su parte *I. edulis* mostró la mayor concentración foliar de N, y por tanto la concentración de clorofila más alta; no obstante, el promedio de crecimiento en altura fue bajo y el del diámetro se mantuvo dentro de la media de las demás especies. Aunque el crecimiento promedio en altura y diámetro en *R. rospigliosii* fue uno de los mayores, su concentración foliar de nutrientes fue mucho menor. Finalmente, *C. spinosa* exhibió una menor concentración foliar de nutrientes, concentración media de clorofila, mayor tasa de crecimiento en altura y número de hojas, y menor tasa de crecimiento en diámetro.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Efecto de los tratamientos en las propiedades fisicoquímicas del suelo

El significativo incremento del pH del suelo, luego de la aplicación de compost, puede estar asociado al aumento de la CIC del suelo debido a la introducción de cationes básicos como K^+ , Ca^+ y Mg^+ , y a la complejación de iones libres de H^+ y Al^{3+} con ligandos orgánicos (Mkhabela y Warman, 2005). Dichas reacciones son el resultado de la disolución de componentes alcalinos en el compost, entre ellos, las cenizas (Cogger, 2005; Ghosh *et al.*, 2014). En este estudio, el pH pasó de ser ligeramente ácido (6,3) a ligeramente alcalino (7,8), incremento equivalente a 1.5 unidades. La mayoría de los estudios reportan que la adición de compost incrementa el valor del pH del suelo en valores entre cero y una unidad (Cogger, 2005; Roberts, 2006); no obstante, cabe aclarar que los cambios son proporcionales a la tasa de aplicación y al valor inicial del pH (Eghball, 2002; Hargreaves *et al.*, 2008), y dependen además del origen y composición de los residuos (Larney y Angers, 2012; Diacono y Montemurro, 2010).

El incremento de la CIC efectiva y la saturación de bases de los tratamientos con compost están directamente relacionados con el aumento del pH de los mismos. De acuerdo con Iglesias y Pérez (1991), el aumento en la densidad de carga de grupos carboxilo y grupos fenólicos de la materia orgánica del suelo, tras el incremento del pH causado por la adición de enmiendas orgánicas, puede estar relacionado con el incremento en la CIC. Esta relación también ha sido descrita por otros autores. Por ejemplo, el estudio de do Carmo *et al.* (2016) evaluó el efecto de diferentes residuos orgánicos (estiércol de animales, residuos de poda, de cosecha, compost, sustratos vegetales, turba y biochar) en las propiedades fisicoquímicas de tres suelos arcillosos de Minas Gerais, Brasil. Los autores reportaron que los suelos tratados con compost de residuos orgánicos y con estiércol animal incrementaron significativamente el porcentaje de saturación de bases en

comparación con los suelos tratados con turba, lodos residuales y aquellos sin enmendar; explicaron también, que dicho efecto fue paralelo al aumento significativo en el pH del suelo y los cambios relacionados con el incremento de la CIC debido a la entrada de cationes básicos y el potencial alcalino de estos residuos. El aumento en la CIC mantiene los nutrientes en formas disponibles para las plantas, previene su lixiviación y neutraliza las sustancias nocivas uniéndolas a sitios de intercambio con otros iones (Ketterings *et al.*, 2007).

El incremento en la CE del suelo luego de la aplicación de compost al suelo también puede estar asociado al incremento del valor del pH y posiblemente sea el resultado de la entrada de nutrientes, sales y nitratos contenidos en los residuos orgánicos del compost (Stamatiadis *et al.* 1999; do Carmo *et al.*, 2016). Cabe anotar que la adición de este compost no incrementó la CE a niveles de salinidad que pueden ser nocivos ($> 3 \text{ dS.m}^{-1}$), incluso para las especies más susceptibles a estos efectos (Miyamoto *et al.*, 2004). La disminución de la disponibilidad del N y la reducción del ciclo de otros nutrientes son los principales efectos del aumento de la concentración de sales solubles en los sustratos de crecimiento (Stamatiadis *et al.*, 1999). Con estas características, el crecimiento vegetal puede incluso inhibirse si el compost se adiciona al suelo repetidas veces y/o en tasas muy altas (Bernal *et al.*, 2017).

El aumento del contenido de carbono orgánico también está relacionado con el aumento de la CIC del suelo, debido a la alta carga negativa de la materia orgánica, lo cual es importante para retener los nutrientes y transformarlos en formas disponibles para las plantas (Diacono y Montemurro, 2010). Según Walter *et al.* (2006), el mayor incremento en el contenido de carbono orgánico con la mayor proporción de compost puede ocurrir debido a que el material orgánico extra estimula la actividad microbológica del suelo y conduce a la rápida mineralización tanto de la materia orgánica nativa, como la de la anteriormente incorporada.

Pese a que no se evidenció un significativo aumento respecto al contenido de materia orgánicos entre los sustratos, los valores encontrados, entre 5 y 5.8 %, indican que son suelos con muy alto contenido de materia orgánica y alta estabilidad estructural (Hazelton y Murphy, 2007). La adición de cascarilla de arroz, otra fuente de materia orgánica, durante la preparación del suelo pudo haber contribuido a que el porcentaje de materia orgánica no presentara diferencias entre los tratamientos. Según Diacono y Montemurro (2010), el aumento en el contenido de materia orgánica también depende de la cantidad y frecuencia de aplicación del compost.

Si bien las propiedades físicas de los tratamientos evaluados en este estudio no mostraron diferencias entre sí, los valores medios de la humedad volumétrica, la densidad aparente y la porosidad obtenidos, indican que se trata de sustratos con buena agregación y estructura, alto contenido de materia orgánica, y son aceptables para el crecimiento vegetal (Roberts, 2006). De acuerdo con Ferrini *et al.* (2007), los beneficios sobre las propiedades físicas del suelo por efecto de la adición de compost son menos

evidentes a corto plazo; esto indica que un aumento en la duración del estudio probablemente hubiese mostrado una tendencia positiva en dichas características.

Efecto de los tratamientos en el contenido de nutrientes en los sustratos

Al igual que las propiedades químicas de los sustratos, el contenido de macronutrientes del suelo, principalmente P y K, fue afectado por la adición de compost. De acuerdo con la proporción de compost aplicada a los sustratos, SC 3:1 fue el tratamiento que, en general, causó el mayor incremento en la fertilidad química de los sustratos. La capacidad del compost de aumentar la disponibilidad de nutrientes para las plantas ha sido reportada en otros estudios. Por ejemplo, Walter *et al.* (2006) reportaron un incremento en el contenido de N, P y K en el suelo con el aumento de las tasas de aplicación de compost de residuos urbanos (0, 40, 80 y 120 Mg ha⁻¹) sobre suelos degradados, después del tercer año de haber sido enmendados. Por su parte, Loper *et al.* (2012) reportaron que, durante el primer año de aplicación, la concentración de P y K en el suelo incrementó tras la incorporación de compost de estiércol bovino a una tasa de 256 mg ha⁻¹. Igualmente, Madejón *et al.* (2016) encontraron que, en comparación con los suelos sin enmendar, la aplicación de compost y alberujo (un subproducto de la adición de aceite de oliva) sobre suelos degradados resultó en el mayor incremento en las concentraciones de N, P y K; no obstante, en este estudio, el contenido de N en el suelo se mantuvo como bajo. El incremento en el contenido de nutrientes en el suelo esta principalmente asociado al contenido de nutrientes de las enmiendas aplicadas, el cual depende evidentemente de la fuente y naturaleza de las materias primas (Gaskin *et al.*, 2008).

Concentración foliar de nutrientes de las especies nativas evaluadas

Las diferencias en el contenido foliar de N están directamente relacionadas con la capacidad de fijación de este nutriente que tienen algunas especies (Drechsel y Zech 1991). Esta particularidad es, tal vez, la característica ecológica más conocida de la familia Leguminosae; no obstante, no todas las leguminosas forman asociaciones con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico (Azani *et al.*, 2017). Esta característica es bastante común en las leguminosas de la subfamilia Mimosaceae, a la cual pertenece *I. edulis* (Leblanc *et al.*, 2005). Lo anterior sugiere que las altas concentraciones de N encontradas en las hojas de esta especie se deben, en parte, al N₂ fijado biológicamente. Otros estudios reportan concentraciones similares de N foliar para ésta y otras especies del mismo género (Aidar *et al.*, 2003; dos Santos *et al.*, 2006).

En contraste, se conoce que la mayoría de las especies de la subfamilia Caesalpinioideae, entre ellas *C. spinosa*, son especies no nodulantes (Azani *et al.*, 2017); ésta puede ser la razón por la cual *C. spinosa* obtuvo una concentración foliar de nitrógeno notoriamente más baja que *I. edulis*, y significativamente equivalente a la de las demás especies. Esto

coincide con las diferencias entre la concentración de nitrógeno foliar encontrada entre varias especies de leguminosas fijadoras y no fijadoras reportadas por Aidar *et al.* (2003).

La menor concentración de nutrientes obtenida en las hojas de *C. spinosa* puede estar relacionada con la alta concentración de compuestos secundarios que esta especie presenta como respuesta a su adaptación a ambientes secos y con altas radiaciones. Naturalmente, *C. spinosa* presenta una alta concentración foliar de compuestos polifenólicos, principalmente taninos, relacionados con su función protectora contra herbívoros (Martel *et al.*, 2014).

La alta concentración Ca en las hojas de *C. subflavescens* y *C. sulcatum* fue equivalente a 57 y 47%, respectivamente, del total de cationes acumulados para estas especies, lo que indica que estas especies acumulan más Ca en sus hojas a expensas de K y Mg, cuando se comparan con las otras especies estudiadas. A excepción de Zn, las concentraciones de Ca, Mg y micronutrientes en *C. subflavescens* estuvieron dentro de los rangos propuestos para especies tropicales de la misma familia (Drechsel, P. y Zech, 1991; Murillo *et al.*, 2013).

A pesar de que K y P fueron abundantes en ambos sustratos con compost, esto no se reflejó en la composición foliar de las especies. No obstante, la concentración foliar de estos nutrientes se mantuvo dentro del rango reportado para otras especies tropicales de leguminosas y verbenáceas (Drechsel y Zech, 1991).

Aunque la concentración de micronutrientes (Zn, B, Mn y Cu) en *C. spinosa* fue la menor entre todas las especies, los valores aquí reportados se consideran suficientes para el crecimiento adecuado (Kalra, 1998)

Efecto de los tratamientos en las características de crecimiento de las especies

Los resultados de este estudio demuestran que la adición de compost al sustrato de siembra tuvo un efecto positivo sobre las características de crecimiento (altura, diámetro del tallo, número de hojas y concentración foliar de clorofila) de las especies evaluadas. En general, árboles sembrados en sustratos enmendados con compost mostraron mayor crecimiento que con el suelo sin enmendar. La adición de compost aumentó el suministro de nutrientes, incrementó el valor del pH y mantuvo concentraciones óptimas de materia orgánica en el sustrato, creando lo que podría considerarse como condiciones más favorables para el crecimiento de los árboles. Los efectos del compost en el crecimiento de los árboles podrían asociarse con el aumento de la disponibilidad de macro y micronutrientes debido a la acción quelante de la materia orgánica, y con la lenta tasa de liberación de nutrientes, especialmente de nitrógeno, que presenta esta enmienda (Scharenbroch, 2009; Diacono y Montemurro, 2010; Al-Bataina, *et al.*, 2016) . El compost también estimula la actividad microbiológica en el suelo, principalmente durante la mineralización del N, lo que significa que los nutrientes están más disponibles en tasas mucho más lentas que los fertilizantes minerales (Oldfield *et al.*, 2015). En investigaciones

previas se reportan los beneficios de la incorporación de compost al suelo sobre las propiedades fisicoquímicas, y su relación con el mejoramiento de las características morfo-fisiológicas de diferentes especies arbóreas (de Lucia *et al.*, 2013; Ansar Shourije *et al.*, 2014; Ghosh *et al.*, 2014; Oldfield *et al.*, 2015; Madejón *et al.*, 2016). Esto puede sugerir que los efectos positivos son específicos de acuerdo con la región, el ambiente y la especie a evaluar.

El efecto de la adición de compost al sustrato de siembra sobre el crecimiento de los árboles también estuvo relacionado con la proporción de compost incorporada. Los promedios de crecimiento mensual en diámetro y altura fueron significativamente mayores con el sustrato con la menor proporción de compost (12.5 %); por otro lado, el promedio mensual del número de hojas fue mayor con el tratamiento con la mayor proporción de compost (25%); no obstante, éste no mostró diferencias respecto al primero, lo cual indica que ambos tratamientos producen el mismo efecto en esta variable. Varios autores reportan la dependencia del crecimiento de las especies de acuerdo a la proporción en la que el compost es mezclado con el sustrato, e indican además que los mejores resultados se obtienen con las menores proporciones (Sæbø y Ferrini, 2006). Por ejemplo, de Lucia *et al.* (2013) reportaron que la altura y el diámetro del tallo de *Rhamnus alaternus* y *Myrthus communis* fueron más bajos en suelos enmendados con 45% de compost, en comparación con el desempeño de estas especies en suelos mezclados con 30% de compost, o sin enmendar. De igual forma, Wróblewska (2008) encontró que la altura total y el diámetro de plantas de *Salix purpurea* sembradas en mezclas de suelo con compost al 10% y 25% fue significativamente mayor que la altura promedio de plantas sembradas con compost al 50% y 100%.

Los resultados aquí descritos indican que las diferencias entre los promedios mensuales de crecimiento de las especies se pueden atribuir a la relación entre las características morfológicas, los hábitos de crecimiento y las necesidades nutricionales de las mismas; sin embargo, se encontraron algunas rarezas en el desempeño de las especies. Por ejemplo, se esperaba encontrar promedios más altos de crecimiento en altura para *I. edulis*, puesto que los reportes de la literatura mencionan que esta especie es de rápido crecimiento, y que de acuerdo a sus comportamiento adquisitivo, presenta alto contenido de nutrientes foliares, principalmente nitrógeno, lo que genera elevadas tasas de respiración y fotosíntesis (González y Fisher, 1994; Salgado-Negret, 2016). Por otro lado, Suárez (2011) y Mahecha (2012) mencionan que *C. subflavescens* y *C. sulcatum* también son especies de rápido crecimiento y requieren abundantes cantidades de luz para su crecimiento; sin embargo se encontró que los promedios de crecimiento en altura fueron los más bajos entre las especies. En contraste, los promedios de crecimiento mensual en altura y diámetro de *C. spinosa* coincidieron con lo reportado por Pérez y Núñez (2017), quienes indican que esta especie invierte sus recursos mayoritariamente en crecimiento longitudinal, y en menor proporción en el diámetro del tallo.

Aunque se presentan datos del desempeño de los árboles antes de su establecimiento en la ciudad, es de destacar que los efectos positivos del compost en las condiciones del suelo y en el crecimiento de las especies toman menos de un año en visualizarse. Por tanto, se considera que este estudio responde a la inmediata necesidad de información relativa a las estrategias de manejo silvicultural que se podrían tener en cuenta para lograr el establecimiento exitoso de los árboles en suelos urbanos.

CONCLUSIONES

La incorporación de compost al sustrato de siembra tuvo efectos positivos en las características químicas y nutricionales del suelo, y en el crecimiento de las cinco especies nativas examinadas. Se encontró una respuesta significativa en el crecimiento de las especies, particularmente con la menor proporción de compost adicionado (Suelo-compost 7:1). De acuerdo con lo anterior, se considera que este estudio apoya la idea de que el compost es una estrategia efectiva para mantener los niveles apropiados de materia orgánica en el suelo, y también para promover el crecimiento de las especies urbanas. Aunque los resultados de este estudio solo pueden mostrar los beneficios de la adición de compost antes de la plantación de los árboles en un ambiente urbano, el mejoramiento de la calidad del suelo y el subsecuente incremento del crecimiento determinados en este experimento, puede prevenir futuras deficiencias en las plantas. Por tanto, se requiere de estudios adicionales de mayor duración donde se evalúen los efectos a largo plazo de la aplicación de compost en las propiedades fisicoquímicas del suelo, su influencia en la duración de la disponibilidad de nutrientes, y el potencial mejoramiento del desempeño de los árboles durante y después de su establecimiento en ambientes urbanos. Bajo la perspectiva de que diseñar un sustrato estándar para todas las especies de plantas es una tarea larga y bastante dispendiosa, los resultados no deben extrapolarse para otras especies diferentes a aquellas examinadas, y por ende futuras investigaciones también serán necesarias para determinar los posibles efectos de mayores y repetidas aplicaciones de esta enmienda en un rango más amplio de especies nativas. Los resultados de este trabajo también sugieren que el establecimiento de la vegetación urbana, basado en el uso del compost como acondicionador del suelo puede ser viable, y además, útil para reducir el impacto ambiental de la disposición los desechos orgánicos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Jardín Botánico de Bogotá y la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Agradezco a Gustavo Ardila, Ariel López, y Milton López por su asistencia técnica y logística durante el montaje y la toma de datos durante el ensayo; al personal del laboratorio de Aguas y Suelos del Centro de Bio-sistemas de la UJTL por su apoyo en el análisis de muestras, también a los operarios de esta institución por su colaboración en las labores mantenimiento y cuidado de los árboles. Finalmente, quiero agradecer a los

profesores Rodrigo Gil y Lina Caicedo por su asesoría durante el análisis estadístico de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Hernández, C. 2014. Especies recomendadas para la arborización urbana de Montería, Colombia. *Revista Nodo*, 8(16): 109–117.
- Aidar, M., Schmidt, S., Moss, G., Stewart, G., y Joly, C. 2003. Nitrogen use strategies of neotropical rainforest trees in threatened Atlantic Forest. *Plant, Cell and Environment*, 26: 389–399.
- Al-Bataina, B., Young, M., y Ranieri, E. 2016. Effects of compost age on the release of nutrients. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3): 230–236.
- Alvarado, A., Guajardo, F., y Devia, S. 2014. Manual de plantación de árboles en áreas urbanas Corporación Nacional Forestal (CONAF), Santiago de Chile. 91 p.
- Ansar, F., Sadeghi, H., y Pessarakli, M. 2014. Effects of Different Types of Composts on Soil Characteristics and Morphological Traits of Two Dry Rangeland Species. *Journal of Plant Nutrition*, 37(12): 1965–1980.
- Azani, N., Babineau, M., Bailey, D., Banks, H., Barbosa, R., Pinto, B., ... Zimmerman, E. 2017. A new subfamily classification of the leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon*, 66(1): 44–77.
- Bernal, P., Sommer, G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., y Frederick, M. (2017). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Advances in Agronomy*, 144: 143–233.
- Cogger, G. 2005. Potential compost benefits for restoration of soils disturbed by urban development. *Compost Science and Utilization*, 13(4): 243–251.
- Cregg, B. y Dix, E. 2001. Tree moisture stress and insect damage in urban areas in relation to heat island. *Journal of Arboriculture*, 27(1): 8–17.
- de Lucia, B., Cristiano, G., Vecchiotti, L., y Bruno, L. 2013. Effect of different rates of composted organic amendment on urban soil properties, growth and nutrient status of three Mediterranean native hedge species. *Urban Forestry y Urban Greening*, 12(4): 537–545.
- Diacono, M., y Montemurro, F. (2010). Review article Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422.
- do Carmo, D. L., de Lima, L. B., y Silva, C. A. 2016. Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 40: 1–17.

- dos Santos, U., de Carvalho Gonçalves, J., y Feldpausch, T. 2006. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 226: 299–309.
- Drechsel, P. y Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees. *Plant and Soil*, 131: 29–46.
- Eghball, B. 2002. Soil Properties as Influenced by Phosphorus- and Nitrogen-Based Manure and Compost Applications. *Agronomy Journal*, 94: 128–135.
- Ferrini, F., Giuntoli, A., Nicese, F., Pellegrini, S. y Vignozzi, N. . Effect of fertilization and backfill amendments on soil characteristics, growth, and leaf gas exchange of English oak (*Quercus robur* L.). *Journal of Arboriculture*, 31(4): 182-190.
- Ferrini, F. y Baietto, M. 2007. Effect of compost-amended backfill and paved surface on leaf parameters and physiology of Norway maple (*Acer platanoides* L.). *Arboriculture and Urban Forestry*, 33(6): 386–391.
- Ferrini, F. y Fini, A. 2011. Sustainable management techniques for trees in the urban areas. *Journal of Biodiversity and Ecological Sciences*, 1(1): 1–20.
- Ghosh, S., Ow, F., y Wilson, B. 2014. Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(4): 1303–1310.
- González, J. y Fisher, F. 1994. Growth of native forest species planted on abandoned pasture land in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 70: 159–167.
- Hargreaves, C., Adl, S. y Warman, R. 2008. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123: 1-14.
- Hazelton, P. y Murphy, B. 2007. *Interpreting Soil Test Results: What do all the Numbers mean?* CSIRO Publishing. Australia. 152 p.
- Iglesias, I. y Pérez, V. 1991. Composting of domestic refuse and sewage sludge. Evolution of temperature, pH, C / N ratio and cation-exchange capacity, *Resources, Conservation and Recycling*, 6: 45–60.
- Kalra, Y. 1998. *Handbook of Methods for Plant Analysis*. Taylor y Francis Group, Boston. 287 p.
- Ketterings, M., Reid, S. y Rao, R. 2007. *Cation Exchange Capacity (CEC)*. Cornell University Cooperative Extension, 1–2.
- Larney, J., y Angers, A. 2012. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 92: 19–38.
- Leblanc, H., McGraw, R., Nygren, P., y Roux, C. 2005. Neotropical legume tree *Inga edulis* forms N₂-fixing symbiosis with fast-growing *Bradyrhizobium* strains. *Plant and Soil*, 275: 123–133.

- Loper, S., Shoher, A., Wiese, C., Denny, G., Stanley, C. y Gilman, E. 2012. Organic Soil Amendment and Tillage Affect Soil Quality and Plant Performance in Simulated Residential Landscapes. *HortScience*, 45(10): 1522–1528.
- Madejón, P., Alaejos, J., García-Álbala, J., Fernández, M., y Madejón, E. 2016. Three-year study of fast-growing trees in degraded soils amended with composts: Effects on soil fertility and productivity. *Journal of Environmental Management*, 169: 18–26.
- Mahecha, E., Ovalle, A., Camelo, D., Rozo A., y Barrero, D. 2012. Vegetación del territorio CAR. 450 especies de sus llanuras y montañas. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, Bogotá. 872 p.
- Martel, C., Rojas, N., Marín, M., Avilés, R., Neira, E., y Santiago, J. 2014. *Caesalpinia spinosa* (Caesalpinaceae) leaves: anatomy, histochemistry, and secondary metabolites. *Revista Brasileira de Botânica*, 37(2): 167–174.
- McDonald, J. 2009. *Handbook of Biological Statistics*. Sparky House Publishing, Baltimore. 299 p.
- Miyamoto, S., Martínez, I., Padilla, M., Portillo, A., y Ornelas, D. 2004. Landscape plant lists for salt tolerance assessment. Texas A&M University, El Paso. 12 p.
- Mkhabela, S. y Warman, R. 2005. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106(1): 57–67.
- Molina, L. 2008. Árboles para Ibagué. Especies que fortalecen la Estructura Ecológica Principal. *Revista Nodo*, 3(5): 71–84.
- Moreno, F. y Hoyos, C. 2015. Guía para el manejo del arbolado urbano en el Valle del Aburrá (Área Metro). Medellín. 347 p.
- Murillo, R., Portuguez, E., Fallas, J., Rios, V., Kottman, F., Verjans, J., ... Alvarado, A. 2013. Nutrient concentration age dynamics of teak (*Tectona grandis* L. f.). *Forest System*, 22(1): 123–133.
- Oldfield, E., Felson, J., Auyeung, D., Crowther, T., Sonti, N., Harada, Y., ... Bradford, M. 2015. Growing the urban forest: tree performance in response to biotic and abiotic land management. *Restoration Ecology*, 23(5): 707–718.
- Pérez, J. y Núñez, P. 2017. Evaluación del crecimiento de las plántulas de 88 especies de hábito arbóreo, arbustivo, hierbas terrestres, escandecentes y palmas, presentes en el vivero La Florida del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Tesis. Ing. Forestal., Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 127 p.
- Roberts, B. 2006. Compost-containing substrates and their effect on posttransplant growth of containerized tree seedlings. *Arboriculture and Urban Forestry*, 32(6): 289–296.
- Sæbø, A. y Ferrini, F. 2006. The use of compost in urban green areas – A review for practical application. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4: 159–169.

- Scharenbroch, C., y Catania, M. 2012. Soil Quality Attributes as Indicators of Urban Tree Performance, 38(5): 214–228.
- Scharenbroch, C. y Watson, W. 2014. Wood chips and compost improve soil quality and increase growth of *Acer rubrum* and *Betula nigra* in compacted urban soil, 40: 319–331.
- Stamatiadis, S., Werner, M., y Buchanan, M. 1999. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, 12(3): 217–225.
- Suárez, B. 2011. Observaciones sobre la germinación de tres especies del género *Citharexylum jacq.* empleadas en restauración ecológica. *Colombia Forestal*, 14(2): 137–143.
- Tovar, G. 2007. Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Territorios*, (16): 149–173.
- Tovar, G. 2016. Propuesta de plan para la gestión de la infraestructura verde urbana de Bogotá Distrito Capital. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Tesis de Maestría. *Gestión Ambiental*, Pontificia Universidad Jaeriana. Bogotá. 172 p.
- Uribe, E. 1997. Enverdecimiento urbano en Colombia. 253–304. En: Krishnamurthy, K. y Rente, J. (Eds.), *Áreas verdes urbanas en Lationamérica y el Caribe*. Centro de Agroforestería para el desarrollo sostenible. Chapingo. 397 p.
- Walter, I., Martínez, F. y Cuevas, G. 2006. Plant and soil responses to the application of composted MSW in a degraded, semiarid shrubland in central Spain. *Compost Science and Utilization*, 14(2): 147–154.
- Wróblewska, H. 2008. Studies on the effect of compost made of post-use wood waste on the growth of willow plants. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 483: 352–366.
- Zar, J. 2010. *Bioestatal analysis*. Pearson Education Limited. Edinburgo. 944 p.