

Reactivation of nutrient cycling in an urban tropical dry forest after abandonment of agricultural activities

Reactivación del ciclo de nutrientes en un bosque seco tropical urbano tras el abandono de actividades agrícolas

Juan D. León-Pelález¹; William Caicedo-Ruiz²; Jeiner Castellanos-Barliza^{2*}

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Carrera 65 núm. 59A-110, bloque 14-330. C. P. 050034. Medellín, Colombia.

²Universidad del Magdalena. Carrera 32 núm. 22-08. C. P. 470004. Santa Marta, Colombia.

*Corresponding author: jcastellanos@unimagdalena.edu.co; tel.: +575 421 7940 ext. 3242

Abstract

Introduction: Standing leaf litter represent an essential source of organic matter and nutrients to dynamize biogeochemical processes at the ecosystem level.

Objectives: To characterize the accumulation and decomposition of organic materials and flow of nutrients from standing litter in an urban dry tropical forest in a successional stage, after 10 years of abandonment of agricultural activities, and to determine the potential use of three species in future active restoration activities.

Materials and methods: Standing litter samples were collected from a forest fragment in Santa Marta, Colombia, separating leaves, reproductive material, woody material and other residues. Additionally, leaves of three species of interest for ecological restoration (*Albizia niopoides* Spruce ex Benth., *Cordia alba* [Jacq.] Roem. & Schult. and *Machaerium milleflorum* Dugand G. A.) were separated and Ca, Mg, K, N and P concentrations were determined.

Results and discussion: Total standing litter was 8.3 Mg·ha⁻¹ with a mean residence time of two years. The leaves represented 20 % of the standing litter, with a mean residence time of 1.4 years. Based on the decomposition constant ($k_d = 0.73$) and the rate of leaf litterfall, organic matter returns accounted for 3.4 Mg·ha⁻¹·year⁻¹. Leaf decomposition rate decreased in the following order *C. alba* > *M. milleflorum* > *A. niopoides*. P represented the greatest limitation with low release rates (0.1 to 1.2 kg·ha⁻¹·year⁻¹).

Conclusions: The passive restoration strategy allowed reactivation of biogeochemical cycle via fine leaf litter. *Cordia alba* showed potential for inclusion in restoration activities, with lower values for leaf N/P ratio, and higher rates for leaf litterfall, litter decomposition and nutrient release.

Keywords: *Albizia niopoides*; *Cordia alba*; *Machaerium milleflorum*; standing litter; nutrient return.

Resumen

Introducción: Las hojas del mantillo representan una fuente esencial de materia orgánica y nutrientes para dinamizar procesos biogeoquímicos a nivel de ecosistema.

Objetivos: Caracterizar la acumulación y descomposición de materiales orgánicos y el flujo de nutrientes desde el mantillo en un bosque seco tropical urbano en estado de sucesión, tras 10 años de abandono de actividades agrícolas, y determinar el potencial de empleo de tres especies en actividades futuras de restauración activa.

Materiales y métodos: En un fragmento de bosque de Santa Marta, Colombia, se colectaron muestras del mantillo separando hojas, material reproductivo, material leñoso y otros restos. Adicionalmente, se separaron las hojas de tres especies de interés para restauración ecológica (*Albizia niopoides* Spruce ex Benth., *Cordia alba* [Jacq.] Roem. & Schult. y *Machaerium milleflorum* Dugand G. A.) y se determinaron las concentraciones de Ca, Mg, K, N y P.

Resultados y discusión: El mantillo acumulado fue 8.3 Mg·ha⁻¹ con un tiempo medio de residencia de dos años. Las hojas representaron 20 % del mantillo acumulado con un tiempo medio de residencia de 1.4 años. Con base en la constante de descomposición ($k_d = 0.73$) y la tasa de caída de hojas del dosel, los retornos de materia orgánica representaron 3.4 Mg·ha⁻¹·año⁻¹. La velocidad de descomposición de las hojas decreció en el orden *C. alba* > *M. milleflorum* > *A. niopoides*. El P representó la mayor limitación con tasas bajas de liberación (0.1 a 1.2 kg·ha⁻¹·año⁻¹).

Conclusiones: La estrategia de restauración pasiva permitió la reactivación del ciclo biogeoquímico vía hojarasca fina. *Cordia alba* mostró potencial para su inclusión en actividades de restauración con valores más bajos en la relación N/P de la hojarasca foliar, así como tasas altas de liberación de nutrientes y de producción y descomposición foliar.

Palabras clave: *Albizia niopoides*; *Cordia alba*; *Machaerium milleflorum*; mantillo; retorno de nutrientes.

Introduction

The tropical dry forest represents 42 % of tropical ecosystems worldwide; however, it is poorly understood especially in terms of dynamics and functioning (Becknell, Kuceck, & Powers, 2012; Rai, Singh, Ghosal, & Singh, 2016). At present, increasing human pressure, together with livestock farming and climate change, generate deterioration of this ecosystem (Becknell et al., 2012; Carbonó & García, 2010; Ferreira & Vieira, 2017).

Colombia has about 1 200 of the original 80 000 km² of tropical dry forest (Flórez-Flórez, León-Peláez, Osorio-Vega, & Restrepo-Llano, 2013), distributed mainly on the Caribbean coast, where the situation is worrisome in cities and populated centers, as representative samples of the ecosystem as part of the urban green infrastructure are practically nonexistent.

In cities, forests influence the improvement of the perception of well-being of their inhabitants (Madureira, Andresen, & Monteiro, 2011), fulfilling important ecological, environmental, social and economic functions (Ferrini & Fini, 2011; Soares et al., 2011). Forest degradation implies the loss of environmental services, so ecological restoration activities should aim not only at the recovery of structure and composition, but also at the recovery of functionality (León & Osorio, 2014).

Understanding the dynamics of urban forests is important for determining their resilience, a key aspect in the design of urban green infrastructure to mitigate problems such as climate change and environmental degradation in cities (Colding, 2011).

Ecological processes such as nutrient cycling, via leaf litter production and decomposition, determine key trajectories in the resilience process and support of ecosystem services as a result of ecological restoration activities (Castellanos, Blanco, León, & Chavez, 2019; León & Osorio, 2014). These processes lead to the renewal of nutrients in the soil and the subsequent reestablishment of biogeochemical cycles. (Castellanos-Barliza & León, 2011), aspects that have special significance in the functioning of green areas and forests in urban environments.

This study shows the results of the monitoring of nutrient cycling in an urban tropical dry forest in a successional stage, located on land that was used for agricultural production (10 years of abandonment). The main objective was to characterize the accumulation and decomposition of organic materials and the flow of nutrients from standing litter. Based on the study of these processes, the potential use of three species (*Albizia niopoides* Spruce ex Benth., *Cordia alba* [Jacq.] Roem. &

Introducción

El bosque seco tropical representa 42 % de los ecosistemas tropicales a nivel mundial; no obstante, es poco conocido especialmente en términos de su dinámica y funcionamiento (Becknell, Kuceck, & Powers, 2012; Rai, Singh, Ghosal, & Singh, 2016). En la actualidad, la creciente presión humana, junto a la ganadería y el cambio climático, generan deterioro de este ecosistema (Becknell et al., 2012; Carbonó & García, 2010; Ferreira & Vieira, 2017).

En Colombia persisten cerca de 1 200 de los 80 000 km² originales del bosque seco tropical (Flórez-Flórez, León-Peláez, Osorio-Vega, & Restrepo-Llano, 2013), distribuidos principalmente en la costa Caribe, donde la situación es preocupante en ciudades y centros poblados, pues las muestras representativas del ecosistema como parte de la infraestructura verde urbana son inexistentes prácticamente.

En las ciudades, los bosques influyen en la mejora de la percepción de bienestar de sus habitantes (Madureira, Andresen, & Monteiro, 2011), cumpliendo importantes funciones ecológicas, medioambientales, sociales y económicas (Ferrini & Fini, 2011; Soares et al., 2011). La degradación de los bosques supone la pérdida de servicios ambientales, por lo que las actividades de restauración ecológica deben propender no solo por la recuperación de la estructura y composición, sino por la de funcionalidad (León & Osorio, 2014).

La comprensión de la dinámica de los bosques urbanos es importante para la determinación de su resiliencia, aspecto clave en el diseño de infraestructura verde urbana, de forma que esta atenúe problemáticas como el cambio climático y la degradación ambiental en las ciudades (Colding, 2011).

Los procesos ecológicos como el ciclaje de nutrientes, vía producción y descomposición de la hojarasca, determinan trayectorias clave en el proceso de resiliencia y el soporte de servicios ecosistémicos como resultado de actividades de restauración ecológica (Castellanos, Blanco, León, & Chavez, 2019; León & Osorio, 2014). A través de dichos procesos se produce la renovación de los nutrientes en el suelo y el restablecimiento posterior de los ciclos biogeoquímicos (Castellanos-Barliza & León, 2011), aspectos que tienen significado especial en el funcionamiento de las áreas verdes y bosques en los ambientes urbanos.

Este trabajo presenta los resultados del monitoreo del ciclo de nutrientes en un bosque seco tropical urbano en estado de sucesión, localizado en tierras que fueron empleadas para la producción agrícola (10 años de abandono). El objetivo principal fue caracterizar

Schult. and *Machaerium milleflorum* Dugand G. A.) was determined for future active restoration activities.

Materials and Methods

Study area

The study was carried out in an 11-year-old secondary dry forest fragment, located in the city of Santa Marta, Colombia (11° 13' N y 74° 11' W; 21 m). Mean annual temperature is 27 °C with mean annual precipitation of 608.8 mm (Montes-Correa et al., 2015). The dominant tree species are *A. niopoides*, *C. alba* and *M. milleflorum* with stand-level densities of 50, 85 and 36 individuals·ha⁻¹, respectively. The soils are alkaline (pH 8.2) with high contents of organic matter (4.0 %) and exchangeable bases. The forest fragment developed spontaneously after the abandonment of agricultural activities, mainly cotton crops, representing a passive restoration strategy. A more detailed description of the characteristics of the study site can be found in Castellanos-Barliza, León-Peláez, Armenta-Martínez, Barranco-Pérez, and Caicedo-Ruíz (2018).

Monitoring and classification of standing litter

A total of fourteen samples were taken from the leaf litter layer accumulated on the soil surface or standing litter (O horizon), each with an area of 0.5 m². The plant material samples were taken to the Biogeochemistry laboratory of the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, where they were dried in an oven at 65 °C, until constant dry weight. The following fractions were separated for each sample: leaves of *A. niopoides* (LA), leaves of *C. alba* (LC), leaves of *M. milleflorum* (LM), leaves of other species (LOS), reproductive material (RM), woody material (WM) and other remains (OR). Leaf material of the dominant species (LA, LC and LM) was ground for ash determination in a 600 °C muffle. Subsequently, elemental concentrations of nitrogen (N) and phosphorus (P) were obtained by micro-Kjeldahl and acid digestion (L-ascorbic), respectively. Calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K) were determined by dry digestion and atomic absorption reading (Perkin Elmer Instruments 2380, USA).

Leaf litter decomposition and nutrient fluxes

The rate of leaf litter decomposition in standing litter was determined by calculating the decomposition coefficient $k_j = A/(F + A)$ (Jenny, Gessel, & Bingham, 1949); where, A is the amount of leaf litter falling annually from the canopy to the ground and F is the amount of leaf litter accumulated on the ground.

The values of leaf litter production (A) used for the calculations were obtained from leaf litter traps installed in the forest fragment, the results have been

la acumulación y descomposición de materiales orgánicos y el flujo de nutrientes desde el mantillo. Adicionalmente, a partir del estudio de estos procesos, se determinó el potencial de empleo de tres especies (*Albizia niopoides* Spruce ex Benth., *Cordia alba* [Jacq.] Roem. & Schult. y *Machaerium milleflorum* Dugand G. A.) para actividades futuras de restauración activa.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en un fragmento de bosque seco secundario de 11 años en recuperación, localizado en la ciudad de Santa Marta, Colombia (11° 13' LN y 74° 11' LO; 21 m). La temperatura media anual es 27 °C con precipitación media anual de 608.8 mm (Montes-Correa et al., 2015). Las especies arbóreas dominantes son *A. niopoides*, *C. alba* y *M. milleflorum*, cuyas densidades a nivel de rodal son 50, 85 y 36 individuos·ha⁻¹, respectivamente. Los suelos son alcalinos (pH 8.2) con altos contenidos de materia orgánica (4.0 %) y bases intercambiables. El fragmento de bosque se desarrolló espontáneamente tras el abandono de las actividades agrícolas, principalmente cultivos de algodón, representando una estrategia de restauración pasiva. Una descripción más detallada de las características del sitio de estudio se encuentra en Castellanos-Barliza, León-Peláez, Armenta-Martínez, Barranco-Pérez, y Caicedo-Ruíz (2018).

Monitoreo y clasificación del mantillo acumulado

Se tomaron 14 muestras de la capa de hojarasca acumulada sobre la superficie del terreno o mantillo (horizonte O), cada una de un área de 0.5 m². Las muestras de material vegetal se llevaron al laboratorio de Biogeoquímica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, donde se secaron en horno a 65 °C, hasta obtener peso seco constante. Para cada una de las muestras se separaron las fracciones siguientes: hojas de *A. niopoides* (HAB), hojas de *C. alba* (HC), hojas de *M. milleflorum* (HMc), hojas de otras especies (HOE), material reproductivo (MR), material leñoso (ML) y otros restos (OR). El material foliar de las especies dominantes (HAB, HC y HMc) se molió para la determinación de cenizas en mufla a 600 °C. Posteriormente, las concentraciones elementales de nitrógeno (N) y fósforo (P) se obtuvieron mediante micro-Kjeldahl y digestión de ácidos (L-ascórbico), respectivamente. El calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) se determinaron por digestión vía seca y lectura por absorción atómica (Perkin Elmer Instruments 2380, EUA).

Descomposición de la hojarasca y flujo de nutrientes

La velocidad de descomposición de la hojarasca en el mantillo se determinó mediante el cálculo del coeficiente de descomposición $k_j = A/(F + A)$ (Jenny, Gessel, &

published in Castellanos-Barliza et al. (2018). The mean residence time (MRT, years) of leaf litter and nutrients were calculated as the inverse of the coefficient k_j ($MRT = 1/k_j$) (León, González, & Gallardo, 2011). The potential nutrient return rate (PRR), via leaf litter, was calculated by multiplying the leaf dry mass by the concentration of each nutrient. The actual return rate of each nutrient (ARR) was calculated by multiplying the PRR by the respective decomposition constant k_j . The amount of each nutrient stored in standing litter leaves, nutrient retention by standing litter (NRSL), was calculated by multiplying the leaf dry mass of the leaves by the concentration of the nutrient in them. Finally, for each nutrient, an effective rate of return (ERR) was obtained by the coefficient between PRR and NRSL. ERR values close to 1 indicate that the amounts of nutrients reaching the soil surface annually, via leaf litter, are similar to those that accumulate in litter layer. Low ERR values indicate nutrient accumulation in standing litter (León et al., 2011).

Data analysis

Data was subjected to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's comparison of means ($P = 0.05$), to determine differences between the dry mass values of the standing litter fractions, as well as their potential return via fine leaf litter and nutrient concentrations. Previously, heteroscedasticity and homogeneity of variances (normality test) were tested. The analyses were performed using STATGRAPHICS Centurion version 16.2 (Statpoint Technologies, 2013).

Results

Leaf litter accumulation and decomposition

Table 1 shows the results of the analysis of leaf litter decomposition and accumulation on the soil of an urban forest fragment. Total standing litter accounted for $8.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, in which woody materials (39 %) and other residues (34 %) accounted for the greatest participation, while reproductive material had a smaller participation (6 %). Leaf litter from standing litter represented 20 % of the total; *M. milleflorum* and *A. niopoides* had similar participation (12 and 13 %, respectively), while *C. alba* only represented 3 %. Leaves of other species were predominant with a value of $1.2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}\cdot\text{year}^{-1}$, representing 71 % of the leaves in the standing litter (Figure 1).

Leaf litter production was higher than leaf accumulation in standing litter, except for *M. milleflorum* leaves (Figure 1). Based on Table 2, the greatest difference between production and accumulation was determined for *C. alba*, which was reflected in the constant k_j implying higher decomposition rate ($k_j = 0.96$) and lower mean residence time ($MRT = 1.04$

Bingham, 1949); donde, A es la cantidad de hojarasca que cae anualmente desde el dosel hasta el suelo y F es la cantidad de hojarasca acumulada sobre el suelo.

Los valores de producción de hojarasca (A) empleados para los cálculos fueron obtenidos de trampas de hojarasca instaladas en el fragmento de bosque, cuyos resultados han sido publicados en Castellanos-Barliza et al. (2018). El tiempo medio de residencia (TMR, años) de la hojarasca y de los nutrientes se calcularon como el inverso del coeficiente k_j ($TMR = 1/k_j$) (León, González, & Gallardo, 2011). La tasa de retorno potencial de nutrientes (TRP), vía hojarasca foliar, se calculó multiplicando la masa seca foliar por la concentración de cada nutriente contenido en ella. La tasa de retorno real de cada nutriente (TRR) se calculó multiplicando la TRP por la constante de descomposición k_j respectiva. La cantidad de cada nutriente almacenado en las hojas del mantillo -retención de nutrientes por el mantillo (RNM)- se calculó como la masa seca foliar de las hojas del mantillo por la concentración del nutriente en ellas. Finalmente, para cada nutriente se obtuvo un índice de eficacia del retorno (IER) mediante el cociente entre TRP y RNM. Los valores IER cercanos a 1 indican que las cantidades de nutrientes que llegan anualmente hasta la superficie del suelo, vía hojarasca foliar, son similares a las que se acumulan en el mantillo. Los valores IER bajos indican la acumulación del nutriente en el mantillo (León et al., 2011).

Análisis de datos

Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias de Tukey ($P = 0.05$), para determinar la existencia de diferencias entre los valores de masa seca de las fracciones de mantillo foliar de las especies, así como de su retorno potencial vía hojarasca fina y concentraciones de nutrientes. Previamente, la heterocedasticidad y homogeneidad de varianzas (prueba de normalidad) se comprobaron. Los análisis se realizaron mediante el programa STATGRAPHICS Centurion versión 16.2 (Statpoint Technologies, 2013).

Resultados

Acumulación y descomposición de hojarasca

El Cuadro 1 muestra los resultados del análisis de la descomposición y acumulación de hojarasca en el suelo de un fragmento de bosque urbano. El mantillo total acumulado representó $8.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, en el cual los materiales leñosos (39 %) y otros restos (34 %) representaron la mayor parte, mientras que el material reproductivo tuvo menor participación (6 %). La hojarasca foliar del mantillo representó 20 % del total; las especies *M. milleflorum* y *A. niopoides* tuvieron participación similar (12 y 13 %, respectivamente),

Table 1. Standing leaf litter and other fractions in an urban dry forest fragment in Santa Marta, Colombia.**Cuadro 1. Acumulación de mantillo y sus fracciones en un fragmento de bosque seco urbano en Santa Marta, Colombia.**

Variable	LC/ HC	LM/ HMc	LA/ HAB	LOS/ HOE	TSSL/ MF	WM/ ML	RM/ MR	OR	TSL/ MT
Standing litter (kg·ha ⁻¹)/ Mantillo (kg·ha ⁻¹)	51 ±	206 ±	224 ±	1 190 ±	1 671 ±	3 265 ±	535 ±	2 878 ±	8 349 ±
CV (%)	148	155	116	73	51	43	74	73	24
Fraction (%) / Fracción (%)	3.07	12.33	13.39	71.21	20.01	39.11	6.41	34.47	100

CV: coefficient of variation. Different letters indicate statistically significant difference according to Tukey's test ($P < 0.05$). ± Standard deviation of the mean ($n = 14$). LC = *Cordia alba*, LM = *Machaerium milleflorum*, LA = *Albizia niopoides*, LOS = leaves of other species, TSSL = total standing leaf litter, WM: woody material, RM: reproductive material, OR: other residues, TSL: total standing litter.

CV: coeficiente de variación. Letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($P < 0.05$). ± Desviación estándar de la media ($n = 14$). HC = *Cordia alba*, HMc = *Machaerium milleflorum*, HAB = *Albizia niopoides*, HOE = hojas de otras especies, MF = mantillo foliar total, ML: material leñoso, MR: material reproductivo, OR: otros restos, MT: mantillo total.

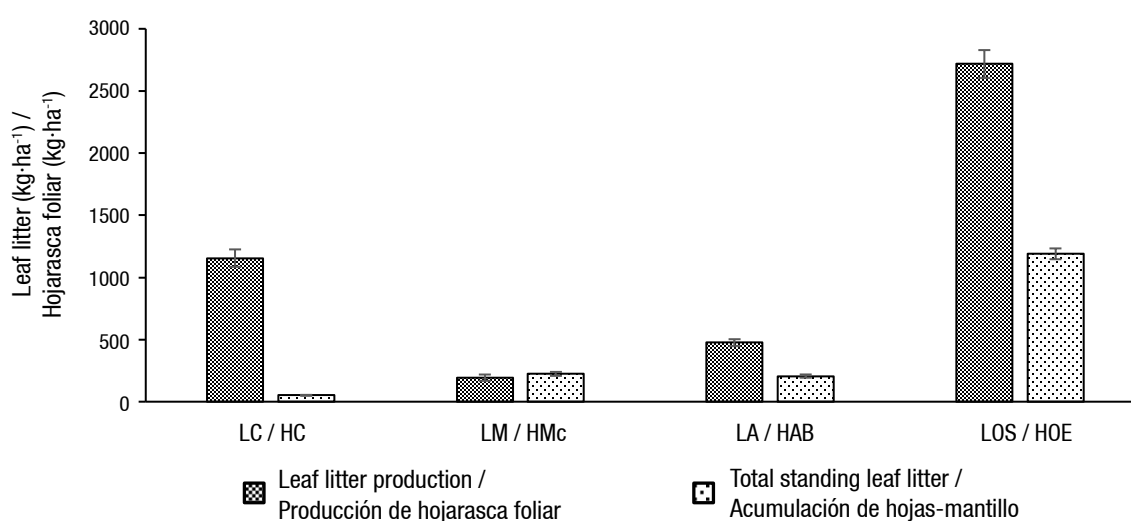


Figure 1. Annual leaf litter production and accumulation of leaves in standing litter for the studied species (LC: *Cordia alba*, LM: *Machaerium milleflorum*, LA: *Albizia niopoides*, LOS: leaves of other species) in an urban tropical dry forest fragment in Santa Marta, Colombia.

Figura 1. Producción anual de hojarasca foliar y acumulación de hojas en el mantillo para las especies estudiadas (HC: *Cordia alba*, HMc: *Machaerium milleflorum*, HAB: *Albizia niopoides*, HOE: hojas de otras especies) en un fragmento de bosque seco tropical urbano en Santa Marta, Colombia.

years). Of the three species studied, *A. niopoides* showed the lowest decomposition rate ($k_d = 0.46$) and the longest residence time (2.15 years). For the total standing litter, the constant $k_d = 0.50$ implies a time of 2.01 years for total decomposition to be verified.

Nutrient release from standing leaf litter

According to Table 3, N was the element with higher values in standing litter (NRSL) for all species (LM = 4.16 kg·ha⁻¹·year⁻¹; LA = 4.95 kg·ha⁻¹·year⁻¹; LC / 0.60 kg·ha⁻¹·year⁻¹), showing, in turn, the lowest values of the release constant k_d . In contrast, P had the lowest accumulation in standing leaf litter (LM = 0.08 kg·ha⁻¹·year⁻¹; LA = 0.07 kg·ha⁻¹·year⁻¹;

mientras que *C. alba* solo representó 3%. Por su parte, las hojas de otras especies predominaron con un valor de 1.2 Mg·ha·año⁻¹, representando 71% de la hojarasca foliar del mantillo (Figura 1).

La producción de hojarasca foliar fue superior a la acumulación de hojas en el mantillo, a excepción de las hojas de *M. milleflorum* (Figura 1). Con base en el Cuadro 2, la mayor diferencia entre producción y acumulación se determinó para *C. alba*, lo cual se reflejó en la constante k_d que supone mayor velocidad de descomposición ($k_d = 0.96$) y menor tiempo medio de residencia (TMR = 1.04 años). De las tres especies estudiadas, *A. niopoides* mostró la menor tasa descomposición ($k_d = 0.46$) y el mayor tiempo de

Table 2. Decomposition and mean residence time (MRT) of standing litter fractions of the species studied in an urban dry forest fragment in Santa Marta, Colombia.**Cuadro 2. Descomposición y tiempo medio de residencia (TMR) de las fracciones de mantillo de las especies estudiadas en un fragmento de bosque seco urbano en Santa Marta, Colombia.**

Fractions / Fracciones	A(kg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	F(kg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	k _j	MRT (years)/ TMR (años)
LC/HC	1 155.11	51.23	0.96	1.04
LM/HMc	475.09	206.02	0.70	1.43
LA/HAB	193.42	223.77	0.46	2.16
LOS/HOE	2 716.76	1 189.63	0.70	1.44
TSSL/MF	4 540.37	1 670.65	0.73	1.37
TSL/MT	8 248.00	8 349.19	0.50	2.01

A: anual leaf litter production, F: amount of standing litter, k_j: Jenny's decomposition constant (Jenny et al., 1949), LC: leaves of *Cordia alba*, LM: leaves of *Machaerium milleflorum*, LA: leaves of *Albizia niopoides*, LOS: leaves of other species, TSSL: total standing leaf litter, TSL: total standing litter.

A: producción anual de hojarasca, F: cantidad de mantillo sobre el suelo, k_j: constante de descomposición de Jenny (Jenny et al., 1949), HC: hojas de *Cordia alba*, HMc: hojas de *Machaerium milleflorum*, HAB: hojas de *Albizia niopoides*, HOE: hojas de otras especies, MF: mantillo foliar total, MT: mantillo total.

LC = 0.07 kg·ha⁻¹·year⁻¹). For cations, accumulation in standing litter followed the decreasing sequence Ca > Mg > K in all species. According to the ERR values, species had higher efficiency in returning cations than N and P. The highest efficiency was for *C. alba* followed by *M. milleflorum* and *A. niopoides*.

Discussion

The values of litter accumulation and decomposition, after the abandonment of productive activities, show a visible reactivation of the biogeochemical cycle in this tropical dry forest ecosystem in successional stage.

Total standing litter was high (8.3 Mg·ha⁻¹·year⁻¹) when compared to values reported for dry forests in early successional stage. Restrepo, Flórez, León, and Osorio (2013) evaluated successional patches of “mosquero” (*Croton leptostachyus* Kunth) and neem (*Azadirachta indica* A. Juss) plantations of ages younger than the fragment studied here (six years). The study aimed to determine how the reactivation of the biogeochemical cycle led, via fine leaf litter contributions, to soil improvement; litter accumulation values were much lower (*C. leptostachyus*: 369 kg·ha⁻¹·year⁻¹ and *A. indica*: 451 kg·ha⁻¹·year⁻¹) to those of the present study. These values of standing litter (expressed as dry mass) are the result of the relationship between production and decomposition rate of organic residues contributed by the forest canopy (León et al., 2011), so it is better to use decomposition rates to interpret the dynamics of biogeochemical cycling more accurately at the ecosystem level. Thus, in the study by Restrepo et al. (2013), k_j values for total standing litter indicated higher decomposition rates in *C. leptostachyus*

residencia (2.15 años). Para el mantillo total acumulado, la constante k_j = 0.50 supone un tiempo de 2.01 años para que se verifique su descomposición total.

Liberación de nutrientes desde las hojas del mantillo

De acuerdo con el Cuadro 3, el N fue el elemento con valores mayores de acumulación en las hojas del mantillo (RNM) para todas las especies (HMc = 4.16 kg·ha⁻¹·año⁻¹; HAB = 4.95 kg·ha⁻¹·año⁻¹; HC = 0.60 kg·ha⁻¹·año⁻¹), mostrando, a su vez, los valores más bajos de la constante de liberación k_j. En contraste, el P tuvo la menor acumulación en las hojas del mantillo (HMc = 0.08 kg·ha⁻¹·año⁻¹; HAB = 0.07 kg·ha⁻¹·año⁻¹; HC = 0.07 kg·ha⁻¹·año⁻¹). Para los cationes, la acumulación en el mantillo siguió la secuencia decreciente Ca > Mg > K en todas las especies. De acuerdo con los valores de IER, las especies tuvieron mayor eficacia en el retorno de cationes que de N y P. La mayor eficacia se obtuvo en *C. alba*, a la cual siguieron *M. milleflorum* y *A. niopoides*.

Discusión

Los valores de acumulación y descomposición del mantillo, tras el abandono de las actividades productivas, señalan una visible reactivación del ciclo biogeoquímico en este ecosistema de bosque seco tropical en estado de sucesión.

La acumulación de mantillo total fue alta (8.3 Mg·ha⁻¹·año⁻¹) si se compara con los valores reportados para bosques secos en estado de sucesión temprana. Restrepo, Flórez, León, y Osorio (2013) evaluaron parches de sucesión de mosquero (*Croton leptostachyus*

successional patches than in *A. indica* plantations ($k_j = 0.71$ vs. 0.55). These values of total standing litter decomposition are higher than those obtained in this study ($k_j = 0.5$), which has a mean residence time of about two years (Table 2) that is lower than that reported for tropical dry forests in Mexico (MRT = 2.79 years Campo & Vázquez-Yanes, 2006). Despite the low k_j value in the present study, organic matter returns to the soil from total standing litter decomposition, in absolute terms, are higher than those reported by Restrepo et al. (2013); fine leaf litter production values are very high ($8.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$), compared to those of *A. indica* ($0.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) and *C. leptostachyus* ($0.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$).

As an integral part of standing litter, the study of leaf fraction is of special interest in the biogeochemical cycle because it represents the major component of fine litter and is relatively easy to decompose, thus representing a fundamental transfer pathway for organic matter and nutrients (Dutta & Agrawal, 2001; Norgrove & Hauser, 2000). The results of both standing litter dynamics and, particularly, leaf fraction are relevant for this dry forest fragment, as they indicate a high return of organic matter ($k_j = 0.73$; MRT = 1.37 years, Table 2). In this ecosystem, leaves collectively represent 20 % of the standing litter, whereas, according to Castellanos-Barliza et al. (2018), the leaves represented 55 % ($4.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) of leaf litter shed from the canopy. This suggests an intense fragmentation of leaves in standing litter towards the fraction other residues, whose participation is very high (35 %, Table 1). Regarding the values of the decomposition constant k_j of this fraction ($k_j = 0.73$) and the annual leaf litterfall just indicated, organic matter returns from decomposition of leaf materials would represent about $3.4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ in this ecosystem. This value is higher than those projected as decomposition returns from k_j values for *A. indica* plantations ($33 \text{ kg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) and for *C. leptostachyus* patches ($72 \text{ kg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) in Colombia. Based on k_j values of litter-bags and leaf litterfall values, organic matter returns projected for dryland silvopastoral systems in Colombia by Martínez, Cajas, León, and Osorio (2014) were much lower (448 to $770 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$).

From the analysis at the species level (Table 2), the rate of leaf decomposition followed the decreasing sequence *C. alba* > *M. milleflorum* > *A. niopoides*. Since this order is also found in litter production, the species *C. alba*, with visibly higher values, has a high potential for inclusion in restoration activities and, in general, for reforestation of land in dry climates. León and Osorio (2014) suggest that species to be included in ecological restoration activities and, specially, in the rehabilitation of degraded lands should exhibit good adaptability and high growth rates, as well as high production of rapidly decomposing leaf litter.

Kunth) y plantaciones de nim (*Azadirachta indica* A. Juss) de edades inferiores a la del fragmento aquí estudiado (seis años). El estudio pretendía determinar cómo la reactivación del ciclo biogeoquímico conducía, vía aportes de hojarasca fina, al mejoramiento de los suelos; los valores de acumulación de mantillo fueron muy inferiores (*C. leptostachyus*: $369 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y *A. indica*: $451 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) a los del presente estudio. Estas magnitudes del mantillo acumulado (expresados como masa seca) son el resultado de la relación entre la producción y la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos aportados por el dosel del bosque (León et al., 2011), por lo cual es mejor emplear los índices de descomposición para interpretar la dinámica del ciclo biogeoquímico con mayor precisión a nivel de ecosistema. Así, en el estudio de Restrepo et al. (2013), los valores k_j para el mantillo acumulado total señalaban mayor velocidad de descomposición en los parches de sucesión de *C. leptostachyus* que en las plantaciones de *A. indica* ($k_j = 0.71$ vs. 0.55). Estos valores de descomposición del mantillo total son mayores que los obtenidos en este estudio ($k_j = 0.5$), el cual tiene un tiempo medio de residencia cercano a dos años (Cuadro 2) que es inferior al reportado para bosques secos tropicales de México (TMR = 2.79 años, Campo & Vázquez-Yanes, 2006). A pesar del valor bajo de k_j en el presente estudio, los retornos de materia orgánica al suelo por descomposición del mantillo total, en términos absolutos, son superiores a los reportados por Restrepo et al. (2013); los valores de producción de hojarasca fina son muy elevados ($8.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), frente a los de *A. indica* ($0.6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y *C. leptostachyus* ($0.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

Como parte integral del mantillo, el estudio de la fracción foliar reviste interés especial en el ciclo biogeoquímico por representar el componente mayoritario de la hojarasca fina y ser de descomposición relativamente fácil, representando así una vía de transferencia fundamental de materia orgánica y nutrientes (Dutta & Agrawal, 2001; Norgrove & Hauser, 2000). Los resultados tanto de dinámica del mantillo y, particularmente, de la fracción foliar son relevantes para este fragmento de bosque seco, ya que señalan un retorno elevado de materia orgánica ($k_j = 0.73$; TMR = 1.37 años, Cuadro 2). En este ecosistema, las hojas representan en su conjunto 20 % del mantillo, mientras que, de acuerdo con Castellanos-Barliza et al. (2018), la participación era de 55 % ($4.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en la hojarasca fina desprendida del dosel. Esto sugiere una fragmentación intensa de las hojas en el mantillo hacia la fracción otros restos, cuya participación es muy alta (35 %, Cuadro 1). Si se consideran los valores de la constante de descomposición k_j de esta fracción ($k_j = 0.73$) y de la caída de hojarasca foliar anual recién indicada, los retornos de materia orgánica por descomposición de los materiales foliares representarían cerca de

Nutrient release from standing litter

N was the nutrient with the highest accumulation in litter layer, as a result of the low values of the release constant k_j (Table 3); however, high rates of N return through canopy leaf litter (PRR) produced in turn high absolute values of actual return (ARR), which were only lower than those of Ca, the element for which the absolute maximums were determined in the three species. Only for *C. alba*, the ARR values of Mg and K were higher than those of N. The opposite situation occurred with P, a nutrient that was released in minimum quantity from the leaves in standing litter, reaching absolute minimums in ARR among nutrients studied. Low levels of P released from standing litter (ARR) are based on a low return through leaf litter for the species studied (PRR), result of a low foliar concentration of the nutrient (0.07 a 0.11 %, Castellanos-Barliza et al., 2018).

A low level of P in leaf litter provides a severe restriction on plant growth and, specifically, on the activity of soil microorganisms, because of the high requirements of the nutrient (Swift, Heal, & Anderson, 1979). Thus, a critical value of 12 has been proposed for the N/P ratio of leaf litter (Aerts, 1997); in tropical environments, this value represents some degree of P scarcity for decomposer organisms, since in fungal and bacterial cells such a ratio is around 10 to 15. N/P values for the three species (*A. niopoides* = 24; *M. milleflorum* = 23, *C. alba* = 11, Castellanos-Barliza et al., 2018) suggest that only *C. alba* produces leaf litter favorable for soil microbial activity and, with it, for nutrient recycling in the ecosystem. In fact, the lower value of the N/P ratio was reflected in a faster decomposition of *C. alba* leaves (Table 2) with respect to the other two species with higher N/P values.

In conclusion, in this tropical dry forest fragment, the abandonment of agricultural activities (10 years) and the consequent advance of natural succession allowed the reactivation of the biogeochemical cycle, based on the production and decomposition of fine leaf litter. The relatively high rates of litter production and decomposition in this ecosystem were probably influenced by agricultural field management practices prior to abandonment. However, a severe ecosystem-level constraint on P availability was evident, with low amounts of return through leaf litter and release from standing litter (PRR, ARR, k_j), as well as low IER values. Of the three species, only *C. alba* had favorable performance, despite this restriction to ecosystem functioning. This species, in addition to producing a high amount of easily decomposable leaf litter, puts into circulation larger amounts of P that do not bioaccumulate, but are released for the most part, as demonstrated by the maximum values of IER.

3.4 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ en este ecosistema. Esta cifra es superior a las proyectadas como retornos por descomposición, a partir de los valores k_j para las plantaciones de *A. indica* (33 kg C·ha⁻¹·año⁻¹) y para los parches de *C. leptostachyus* (72 kg C·ha⁻¹·año⁻¹) de Colombia. Asimismo, aunque se parte de valores k_j de bolsas de descomposición (*litter-bags*) y de valores de caída de hojarasca foliar, los retornos de materia orgánica proyectados para sistemas silvopastoriles de tierras secas de Colombia por Martínez, Cajas, León, y Osorio (2014) fueron muy inferiores (448 a 770 kg·ha⁻¹·año⁻¹).

A partir del análisis realizado a nivel de especie (Cuadro 2), la velocidad de descomposición de hojas siguió la secuencia decreciente *C. alba* > *M. milleflorum* > *A. niopoides*. Dado que este mismo orden se presenta en la producción de hojarasca, la especie *C. alba*, con valores visiblemente superiores, se perfila con un potencial alto para su inclusión en actividades de restauración y, en general, de repoblamiento de tierras en climas secos. León y Osorio (2014) sugieren que las especies que se incluyan en actividades de restauración ecológica y, particularmente, en la rehabilitación de tierras degradadas deben exhibir buena capacidad de adaptación y tasas altas de crecimiento, así como producción elevada de hojarasca foliar que se descomponga rápidamente.

Liberación de nutrientes desde el mantillo

El N fue el nutriente con mayor acumulación en el mantillo, resultado de los valores bajos de la constante de liberación k_j (Cuadro 3); sin embargo, las tasas altas de retorno de N a través de la hojarasca foliar del dosel (TRP) produjeron a su vez valores absolutos altos de retorno real (TRR), los cuales solo fueron inferiores a los de Ca, elemento para el que se determinaron los máximos absolutos en las tres especies. Únicamente para *C. alba*, los valores TRR de Mg y K fueron superiores a los de N. La situación contraria ocurrió con P, nutriente que se liberó en mínima cantidad desde las hojas acumuladas en el mantillo, alcanzando los mínimos absolutos en la TRR entre los nutrientes estudiados. Los niveles bajos de P liberados desde el mantillo (TRR) parten de un retorno bajo a través de la hojarasca foliar para las especies estudiadas (TRP), resultado a su vez de una concentración foliar baja del nutriente (0.07 a 0.11 %, Castellanos-Barliza et al., 2018).

Un nivel bajo de P en la hojarasca foliar ejerce una restricción severa para el crecimiento vegetal y, específicamente, para la actividad de los microorganismos del suelo, dados los requerimientos elevados del nutriente (Swift, Heal, & Anderson, 1979). Así, un valor crítico de 12 ha sido propuesto para la relación N/P de la hojarasca foliar (Aerts, 1997); en ambientes tropicales, este valor representa algún grado

Table 3. Indices of nutrient return, retention and release processes via standing leaf litter for each of the species studied in an urban dry forest fragment in Santa Marta, Colombia.**Cuadro 3. Índices de los procesos de retorno, retención y liberación de nutrientes vía mantillo para cada una de las especies estudiadas en un fragmento de bosque seco urbano en Santa Marta, Colombia.**

Indices/Índices	N	P	Ca	Mg	K
(kg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)/(kg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)					
<i>Machaerium milleflorum</i>					
PRR/TRP	7.74	0.31	18.67	1.78	2.64
NRSL/RNM	4.16	0.08	1.83	0.10	0.16
kj	0.65	0.79	0.91	0.95	0.94
MRT/TMR	1.54	1.26	1.10	1.06	1.06
ARR/TRR	5.04	0.25	17.00	1.68	2.48
ERR/IER	1.86	3.80	10.18	17.25	16.00
<i>Albizia niopoides</i>					
PRR/TRP	4.81	0.16	3.64	0.37	1.01
NRSL/RNM	4.95	0.07	1.55	0.11	0.13
kj	0.49	0.71	0.70	0.77	0.88
MRT/TMR	2.03	1.42	1.42	1.31	1.13
ARR/TRR	2.37	0.11	2.55	0.28	0.89
ERR/IER	0.97	2.40	2.35	3.27	7.54
<i>Cordia alba</i>					
PRR/TRP	14.66	1.29	36.54	17.33	16.28
NRSL/RNM	0.60	0.07	0.50	0.05	0.09
kj	0.96	0.95	0.99	1.00	0.99
MRT/TMR	1.04	1.06	1.01	1.00	1.01
ARR/TRR	14.09	1.22	36.04	17.29	16.19
ERR/IER	24.37	18.01	72.37	377.63	177.33

PRR: potential nutrient return rate via leaf litter, NRSL: nutrient retention in standing leaf litter, ARR: actual nutrient return rate, kj: Jenny's decomposition constant, MRT: mean residence time (years), ERR: effective rate of return.

TRP: tasa de retorno potencial de nutrientes vía hojarasca foliar, RNM: retención de nutrientes en la hojarasca foliar del mantillo, TRR: tasa de retorno real de nutrientes, kj: constante de descomposición de Jenny, TMR: tiempo medio de residencia (años), IER: índice de eficacia del retorno.

Conclusions

Restoration processes in tropical dry forests will surely be favored by an adequate supply of nutrients, mainly P, which, although present in the soil, is precipitated and therefore poorly bioavailable for both plants and microorganisms. In fact, it has been stated that vegetation included in restoration models usually must overcome the low availability of P in the soil to achieve satisfactory growth and development. The results suggest that *Cordia alba* is suitable for incorporation in restoration activities. Furthermore, it is important to carry out more studies of this nature that allow the identification of a greater number of species to increase the success of restoration initiatives in these environments.

de escasez de P para los organismos descomponedores, ya que en las células de hongos y bacterias tal relación se encuentra alrededor de 10 a 15. Los valores N/P para las tres especies (*A. niopoides* = 24; *M. milleflorum* = 23, *C. alba* = 11, Castellanos-Barliza et al., 2018) sugieren que únicamente *C. alba* produce hojarasca foliar favorable para la actividad microbiana del suelo y, con ella, para el reciclaje de nutrientes en el ecosistema. De hecho, el valor inferior de la relación N/P se reflejó en una descomposición más rápida de las hojas de *C. alba* (Cuadro 2) con respecto a las otras dos especies con valores N/P mayores.

En síntesis, en este fragmento de bosque seco tropical, el abandono de las actividades agrícolas (10 años) y el consecuente avance de la sucesión natural permitieron

Acknowledgments

The authors thank the staff of INTROPIC laboratory 9 of the Universidad del Magdalena for the support provided in logistics and for offering space in the laboratory phase. The authors also thank Sergio Ortega for his support and contributions in the study site.

End of English version

References / Referencias

- Aerts, R. (1997). Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Oikos*, 79, 439–449. doi: 10.2307/3546886
- Becknell, J. M., Kucek, L. K., & Powers, J. S. (2012). Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis. *Forest Ecology and Management*, 276, 88–95. doi: 10.1016/j.foreco.2012.03.033
- Campo, J., & Vázquez-Yanes, C. (2004). Effects of nutrient limitation on aboveground carbon dynamics during tropical dry forest regeneration in Yucatán, Mexico. *Ecosystems*, 7(3), 311–319. doi: 10.1007/s.10021-003-0249-2
- Castellanos, B. J., Blanco, R. O., León, P. J. D., & Chávez, L. F. (2019). Planted forests for open coal mine spoils rehabilitation in Colombian drylands: Contributions of fine litterfall through an age chronosequence. *Ecological Engineering*, 138, 180–187. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.018
- Castellanos-Barliza, J., & León, P. J. D. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(1), 113–128. doi: 10.15517/RBT.V59I1.3182
- Castellanos-Barliza, J., León-Peláez, J. D., Armenta-Martínez, R., Barranco-Pérez, W., & Caicedo-Ruiz, W. (2018). Contributions of organic matter and nutrients via leaf litter in an urban tropical dry forest fragment. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 571–585. doi: 10.15517/RBT.V66I2.33381
- Carbonó, E., & García, H. (2010). La vegetación terrestre en la ensenada de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona (Magdalena, Colombia). *Caldasia*, 32(2), 235–256. doi: 10.15446/caldasia
- Colding, J. (2011). The role of ecosystem services in contemporary urban planning. In J. Niemelä, J. Breuste, P. James, T. Elmqvist, & G. N. McIntyre (Eds.), *Urban ecology: Patterns, processes, and applications* (pp. 228–237). New York, USA: Oxford University Press.
- Dutta, R. K., & Agrawal, M. (2001). Litterfall, litter decomposition and nutrient release in five exotic plant species planted on coal mine spoils. *Pedobiologia*, 45(4), 298–312. doi: 10.1078/0031-4056-00088
- Ferreira, M. C., & Vieira, D. L. M. (2017). Topsoil for restoration: Resprouting of root fragments and germination of pioneers trigger tropical dry forest regeneration.

la reactivación del ciclo biogeoquímico, a partir de la producción y descomposición de la hojarasca fina. Las tasas de producción y descomposición de hojarasca relativamente altas en este ecosistema estuvieron probablemente influenciadas por las prácticas de manejo del campo agrícola previas al abandono. No obstante, se evidenció una restricción severa, impuesta a nivel de ecosistema, por la disponibilidad de P, con cantidades bajas de retorno a través de la hojarasca foliar y de liberación desde el mantillo (TRP, TRR, kj), así como valores bajos de IER. De las tres especies, únicamente *C. alba* mostró desempeño favorable, a pesar de esta restricción para el funcionamiento ecosistémico. Esta especie además de producir una cantidad alta de hojarasca de fácil descomposición pone en circulación cantidades mayores de P que no se bioacumulan, sino que se liberan en su mayor parte, conforme lo demostraron los valores máximos del IER.

Conclusiones

Los procesos de restauración del bosque seco tropical seguramente se favorecerán con un suministro adecuado de nutrientes, particularmente de P, el cual, a pesar de estar presente en el suelo se encuentra precipitado y, por tanto, poco biodisponible, tanto para las plantas como para los microorganismos. De hecho, se ha afirmado que la vegetación incluida en modelos de restauración, usualmente, debe superar la baja disponibilidad de P en el suelo para lograr un crecimiento y desarrollo satisfactorios. Los resultados sugieren que *Cordia alba* es idónea para ser incorporada en actividades de restauración. Asimismo, se desprende la importancia de realizar más estudios de esta naturaleza que permitan la identificación de un número mayor de especies con las cuales el éxito de las iniciativas de restauración incremente en estos ambientes.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del laboratorio 9 de INTROPIC de la Universidad del Magdalena por su apoyo en la logística y ofrecimiento de espacio en la fase laboratorio. A Sergio Ortega por su apoyo y aportes en el trabajo de campo.

Fin de la versión en español

Ecological Engineering, 103(A), 1–12. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.03.006

- Ferrini, F., & Fini, A. (2011). Sustainable management techniques for trees in the urban areas. *Journal of Biodiversity and Ecological Sciences*, 1(1), 1–20. Retrieved from <http://jbes.ir/wp-content/docs/vol1/1/1.pdf>
- Flórez-Flórez, C. P., León-Peláez, J. D., Osorio-Vega, N. W., & Restrepo-Llano, M. F. (2013). Dinámica de nutrientes en

- plantaciones forestales de *Azadirachta indica* (Meliaceae) establecidas para restauración de tierras degradadas en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 515–529. doi: 10.15517/RBT.V61I2.11144
- Jenny, H., Gessel, S. P., & Bingham, F. T. (1949). Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science*, 68(6), 419–432. doi: 10.1097/00010694-200606001-00017
- León, J. D., González, M. I., & Gallardo, J. F. (2011). Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(4), 1883–1894. doi: 10.15517/RBT.V59I4.33193
- León, J. D., & Osorio, N. W. (2014). Role of litter turnover in soil quality in tropical degraded lands of Colombia. *The Scientific World Journal*, Article ID 693981. doi: 10.1155/2014/693981
- Madureira, H., Andresen, T., & Monteiro, A. (2011). Green structure and planning evolution in Porto. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(2), 141–149. doi: 10.1016/j.ufug.2010.12.004
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D., & Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, Article ID 359736. doi: 10.1155/2014/359736
- Montes-Correa, A., Jiménez-Bolaños, J., Vergara-Ríos, D., Ávila-Silva, Y., Saboyá-Acosta, L., & Renjifo, J. M. (2015). Herpetofauna del campus de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 5(1), 54–63. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5168116>
- Norgrove, L., & Hauser, S. (2000). Production and nutrient content of earthworm casts in a tropical agrisilvicultural system. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11–12), 1651–1660. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00081-X
- Rai, A., Singh, A. K., Ghosal, N., & Singh, N. (2016). Understanding the effectiveness of litter from tropical dry forests for the restoration of degraded lands. *Ecological Engineering*, 93, 76–81. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.014
- Restrepo, M. F., Florez, C. P., Osorio, N. W., & León, J. D. (2013). Passive and active restoration strategies to activate soil biogeochemical nutrient cycles in a degraded tropical dry land. *ISRN Soil Science*, Article ID 461984. doi: 10.1155/2013/461984
- Soares, A. L., Rego, F. C., McPherson, E. G., Simpson, J. R., Peper, P. J., & Xiao, Q. (2011). Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(2), 69–78. doi: 10.1016/j.ufug.2010.12.001
- Statpoint Technologies, Inc. (2013.) The Plains, Virginia STATGRAPHICS Centurion (XVI) 16.2.04. Retrieved from <http://www.statgraphics.com>
- Swift, M. J., Heal, O. W., & Anderson, J. M. (1979). Decomposition in terrestrial ecosystems (vol. 5). Berkeley, USA: University of California Press.