



Producción y descomposición de hojarasca de especies forestales en sistemas silvopastoriles, Valle del Sinú, Colombia¹

Production and decomposition of leaf litter from forest species in silvopastoral systems, Valle del Sinu, Colombia

Jairo J. Tapia-Coronado², José L. Contreras³, Judith Martínez-Atencia³, Leonardo López³, José L. Rodríguez³

- ¹ Recepción: 19 de enero, 2022. Aceptación: 9 de mayo, 2022. Este trabajo fue parte del proyecto “Estrategias para mejorar la competitividad y sostenibilidad de producción de carne y leche en el Caribe húmedo”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural a través del Convenio No. 1828, y se llevó a cabo en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en el Centro Investigación Turipaná, Montería, Córdoba, Colombia.
- ² Universidad de Córdoba, Grupo de investigación Química de Suelos y Fertilidad de Cultivos. Carrera 6 N°77-305 Montería - Córdoba, Colombia. jjtapia84@gmail.com (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-5832-6626>).
- ³ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, Centro de Investigación Turipaná, Km 13 Vía Montería-Cereté, Colombia. jlcontreras@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-8179-3430>); jcmartinez@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0003-0492-2486>); lalopezr@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-9099-1957>); jlrodriguezv@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-5095-1232>).

Resumen

Introducción. Los sistemas de producción tradicionales de ganadería generan degradación de suelos, por lo cual es importante implementar sistemas silvopastoriles como una alternativa para la producción bovina de carne y leche. **Objetivo.** Cuantificar la producción de hojarasca foliar de especies leñosas perennes (*Gmelina arborea* - Melina, *Tabebuia rosea* - Roble, *Acacia mangium* - Acacia) y el aporte potencial de nutrientes al suelo (ciclaje de nutrientes) dentro de sistemas silvopastoriles. **Materiales y métodos.** Se evaluó la producción y descomposición de hojarasca de especies forestales en campos sembrados con una variedad de gramínea del género *Brachiaria*, en el Valle medio del Sinú, Colombia, durante mayo a septiembre de 2013. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos utilizados fueron Pr= *Brachiaria* híbrido cv. Mulato II, SSP1 = *Tabebuia rosea* + *Brachiaria* cv. Mulato II, SSP2= *Acacia mangium* + *Brachiaria* cv. Mulato II y SSP3= *Gmelina arborea* + *Brachiaria* cv. Mulato II. **Resultados.** Hubo mayor producción de hojarasca en especies forestales dentro de los sistemas silvopastoriles. La especie forestal *G. arborea* obtuvo los mayores aportes potenciales de nutrientes en la hojarasca con el siguiente patrón descendente en kg ha⁻¹: C 4069,6 > Ca 96,47 > N 62,46 > K 37,48 > Mg 23,60 > P 14,57. La hojarasca de la pastura Mulato II y la especie forestal *G. arborea* exhibieron mayor velocidad de descomposición ($k=1,87$ y $k=1,77$, respectivamente) que el resto de las especies evaluadas. **Conclusiones.** Las especies forestales evaluadas mejoraron la calidad del suelo mediante un mayor aporte de hojarasca y un mayor aporte potencial de nutrientes.

Palabras claves: agroecosistemas, liberación de nutrientes, descomposición de la hojarasca, cobertura de suelo.

Abstract

Introduction. Traditional livestock production systems generate soil degradation, so it is important to implement silvopastoral systems as an alternative for meat and dairy cattle production. **Objective.** To quantify the production of



leaf litter of perennial woody species (*Gmelina arborea* - Melina, *Tabebuia rosea* - Oak, *Acacia mangium* - Acacia) and the potential contribution of nutrients to the soil (nutrient cycling) within silvopastoral systems. **Materials and methods.** The production and decomposition of leaf litter of forest species was evaluated in fields planted with a variety of grasses of the genus *Brachiaria*, in the middle Sinu valley, Colombia, during May to September 2013. A randomized complete block design with three replications was used. The treatments used were Pr= *Brachiaria* hybrid cv. Mulato II, SSP1= *Tabebuia rosea* + *Brachiaria* cv. Mulato II, SSP2= *Acacia mangium* + *Brachiaria* cv. Mulato II, and SSP3= *Gmelina arborea* + *Brachiaria* cv. Mulato II. **Results.** The greater production of leaf litter in forest species within the silvopastoral systems was evidenced. The forest species *G. arborea* had the highest potential nutrient inputs in litterfall with the following descending pattern in kg ha⁻¹: C 4069,6> Ca 96,47> N 62,46> K 37,48> Mg 23,60> P 14,57. Mulato II pasture litter and the forest species *G. arborea* exhibited higher decomposition rates ($k= 1.87$ and $k=1.77$, respectively) than the rest of the species evaluated. **Conclusions.** The forest species evaluated improved soil quality through a higher leaf litter input and a higher potential nutrient input.

Keywords: agroecosystems, nutrient release, leaf litter decomposition, land cover.

Introducción

En América Latina y el Caribe la tala indiscriminada de los boques, asociado a la expansión agropecuaria y la necesidad de producción de alimentos, son, entre otros factores, las principales causas de la reducción y degradación de los sistemas boscosos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2020), ya que generan pérdidas en la productividad y competitividad de los sistemas agropecuarios, por ejemplo: el manejo inadecuado del suelo, aumento de procesos de degradación edáfica y ambiental, y aumento de emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las alternativas para aportar a la conservación de estos espacios es introducir especies leñosas perennes de carácter económico en arreglos de sistemas silvopastoriles (SSP), como una forma de producción pecuaria y forestal, en la que, en una misma unidad productiva o finca, se reúnen e interactúan especies leñosas perennes, plantas herbáceas (gramíneas y leguminosas) y animales herbívoros domésticos (bovinos, caprinos, ovinos, etc), los cuales cumplen un rol importante al ofrecer producción de hojarasca, brindar servicios ecosistémicos, productividad económica y sinergia de los elementos que lo conforman, enfocado hacia la sostenibilidad ambiental y edáfica dentro de los sistemas de producción agropecuarios (Cajas-Girón et al., 2013; Contreras-Santos et al., 2019; Portilla Pinzón et al., 2015).

Entre otras características, los sistemas silvopastoriles pueden compensar las limitaciones en la productividad del ganado bovino, asociadas a la escasez y poca calidad de forraje, y disminución del rendimiento asociado a problemas de degradación del suelo (Martínez et al., 2014); además, los bovinos aprovechan la oferta abundante de forraje y al mismo tiempo se benefician por el mejoramiento de las condiciones microclimáticas en un ambiente de bajo estrés calórico que les permite mejores condiciones de pastoreo (Buitrago-Guillen et al., 2018) y beneficia a los productores que se dedican a esta actividad económica de producción agropecuaria (FAO, 2015).

Los árboles presentes en estos SSP, en el proceso gradual de defoliación sobre el suelo, brindan cobertura y más tarde incorporan nutrientes a este a través de la descomposición de las hojas, lo que aumenta la calidad de los pastos y contribuyen en la mejora de la productividad del suelo de forma sostenible, al incrementar su materia orgánica, el ciclaje de nutrientes y la fijación de nitrógeno, sumado a que impide el arrastre del suelo fértil de la superficie (Gaspar-Santos et al., 2015; Moreno Valdez et al., 2018; Zapata Cadavid & Silva Tapasco, 2020).

Existen factores que controlan la tasa de descomposición de la hojarasca, como son la relación N/P, concentración de fósforo (P) y magnesio (Martínez-Atencia et al., 2020); también la macro, meso y microfauna considerados indicadores biológicos de conservación y calidad del suelo, que permiten determinar el grado de recuperación o degradación de este (Pascual-Córdova et al., 2017; Socarrás, 2013) y las variables climáticas precipitación y temperatura (Bradford et al., 2017).

En la región Caribe Colombiana, en los últimos años diferentes autores han adelantado investigaciones en sistemas silvopastoriles, orientados a valorar sus efectos sobre las propiedades físicas, químicas, biológicas de los suelos, confort y alimentación animal (Barragán-Hernández et al., 2015; Cajas-Girón et al., 2013; Contreras Santos et al., 2019; Martínez-Atencia et al., 2020), pero todavía se desconoce la capacidad que presentan algunas especies leñosas perennes (forestales) de importancia económica, en el aporte de nutrientes por medio de la vía aérea o caída de hojarasca, ya que este proceso representa la mayor transferencia de nutrientes de la planta hacia el suelo.

El objetivo de esta investigación fue cuantificar la producción de hojarasca foliar de especies leñosas perennes (*Gmelina arborea* – Melina, *Tabebuia rosea* - Roble y *Acacia mangium* – Acacia, y el aporte potencial de nutrientes al suelo (ciclaje de nutrientes) dentro de sistemas silvopastoriles.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó durante siete meses (de mayo a noviembre del 2013) en las instalaciones del Centro de Investigación Turipaná de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), localizado en Cereté, Córdoba, Colombia (8°51' N, 75°49' W, altitud 18 m s.n.m.). Esta zona presenta una época de lluvias de mayo a noviembre y otra seca de diciembre a abril. La precipitación promedio anual es de 1380 mm, temperatura media anual de 28 °C, evapotranspiración potencial anual de 1240 mm y humedad relativa de 81 %. De acuerdo con la clasificación de zonas de vida realizadas por Holdridge (1982), el área de estudio pertenece al bosque seco tropical (Bs T).

El área de estudio presenta suelos de origen depositacional sedimentario, con horizontes diagnósticos ócrico y cámbico, perteneciente a un *Vertic Endoaquepts* (Soil Survey Staff, 2014), con textura arcillosa (2:1), régimen de humedad údico, temperatura isohipertérmico, drenaje imperfecto y fertilidad alta.

Área experimental

En el Cuadro 1 se describen los sistemas silvopastoriles (SSP1, SSP2 y SSP3) que contienen las especies forestales evaluadas y el tratamiento control (pradera sin árboles – Pr).

El área experimental utilizada para esta investigación fue establecida con las especies perennes leñosas (Cuadro 1) en el Centro de Investigaciones Turipaná en el año 2006, con una distancia de siembra de 3,5 m entre surcos y 3,5 m entre plantas, para una densidad de 816 árboles/ha. Seis años después del establecimiento de los forestales (2012), se realizó una entresaca con una presión del 30 % de la densidad inicial. Posterior a la entresaca, se estableció la pastura (*Brachiaria* híbrido cv. Mulato II) entre las líneas forestales.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar (BCA), con cuatro tratamientos y tres repeticiones. El criterio de bloqueo correspondió a la condición y dirección del drenaje del suelo. Cada unidad experimental estuvo conformada por un área de 833 m², para un total de 10 000 m² en todo el experimento.

Cuadro 1. Sistemas silvopastoriles y pradera sin árboles. Centro de Investigación Turipaná, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Table 1. Silvopastoral systems and grassland without trees. Turipana Research Center, Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Arreglo	Especies*
Pr	<i>Brachiaria</i> híbrido cv. Mulato II
SSP1	<i>Tabebuia rosea</i> + <i>Brachiaria</i> cv. Mulato II
SSP2	<i>Acacia mangium</i> + <i>Brachiaria</i> cv. Mulato II
SSP3	<i>Gmelina arborea</i> + <i>Brachiaria</i> cv. Mulato II

Pr: pradera de gramínea sin árboles; SSP: sistema silvopastoril. / Pr: grass meadow without trees; SSP: silvopastoral system.

*Para el análisis de la información solo se tuvo en cuenta las especies leñosas perennes dentro de los sistemas silvopastoriles. / For the information analysis only perennial woody species within silvopastoral systems were taken into account.

Producción de hojarasca

Para medir la producción de hojarasca foliar (HF) de las especies dentro de los SSP y la pradera sin árboles, se utilizaron trampas circulares con área individual de 0,50 m², con una malla de tela fina (1,5 mm de diámetro de orificio) y profundidad de 40 cm. Las trampas se colocaron a una altura de 1,8 m para evitar el daño por el ganado. La hojarasca producida por la gramínea o material senescente adherido a sus tallos o sobre la superficie del suelo, fue colectada de un área delimitada por círculos metálicos de 0,50 m², ubicados sobre el suelo. Cada semana se recolectó la hojarasca foliar contenida en las trampas y cada cuatro semanas se obtuvo la cantidad de esta producida por especie, inició en la primera semana del mes de mayo de 2013, hasta la última semana del mes de noviembre de 2013.

En cada unidad experimental se seleccionaron tres árboles y se colocaron dos trampas de hojarasca, se tuvo como referencia la mitad de la sombra proyectada de cada árbol. Por especie evaluada se utilizaron dieciocho trampas, para un total de 72 trampas instaladas en todo el experimento. El material recolectado se clasificó por especies y fracción (hojas, raquis, pedúnculos, frutos, flores y otros restos). Una vez realizada la limpieza, clasificación y separación de fracciones, el material foliar obtenido se secó en una estufa a 60 °C hasta alcanzar masa constante (~72 h), la cual se expresa como masa seca por unidad de área (MS) (Jones, 2001)

Aporte potencial de nutrientes

El aporte potencial de nutrientes en la hojarasca de cada especie evaluada, se determinó a partir de la masa seca (MS) y concentración de nutrientes en la hojarasca (kg ha⁻¹). Se realizaron recolectas con periodicidad semanal, posterior a la recolecta, cada ocho semanas las muestras se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta por especies. Luego las muestras fueron rotuladas y enviadas al laboratorio de Química de Suelos y Tejidos Vegetales de AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca), con el fin de realizar la determinación de contenido de carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), relación carbono-nitrógeno (C/N) y relación nitrógeno – fósforo (N/P). Los métodos utilizados por el laboratorio para determinar estos parámetros fueron: C: combustión en húmedo - método Walkley y Black (1934); N: método Kjeldahl (Norma AOAC 988.05) (Rutherford et al., 2008); Ca, Mg, K y P: digestión ácida (HNO₃:HClO₄, 5:2), cuantificación por absorción atómica (Ca, Mg y K) (Kalra, 1998) y espectrofotometría visible (P) (Jones, 2001).

Velocidad de descomposición de la hojarasca foliar

Se determinó la velocidad de descomposición de la hojarasca foliar de las especies forestales y gramínea dentro de los sistemas evaluados, mediante la metodología empleada y descrita por Martínez-Atencia et al. (2020). Para tal fin se emplearon bolsas de descomposición con tamaño de 20 cm de ancho por 20 cm de largo, elaboradas en malla de fibra de metal con tamaño de poro 2 x 2 mm, que permitió la interacción con la fauna edáfica (detritívoros invertebrados) al interior de las bolsas.

En cada unidad experimental se incubaron ocho bolsas, para un total de 120 muestras, colocadas sobre la superficie del suelo, en un área de exclusión de los bovinos, cubiertas por hojarasca y otros residuos presentes del entorno, que simularon condiciones homogéneas a las naturales. Las bolsas de descomposición fueron retiradas de forma alternada (una por cada unidad experimental) a los 30, 90, 150, 180, 210 días después de ubicadas en las parcelas.

Las bolsas colectadas se llevaron a un área de preparación de muestras en laboratorio de AGROSAVIA, Centro de investigación Turipaná, donde el material residual de hojarasca foliar (HF) se limpió con un pincel y se quitó todo el material adherido a ellas. Una vez el material estuvo limpio, se secó en una estufa [60 °C hasta alcanzar masa constante (~72 h)], expresado como masa seca residual (MSR). La velocidad de descomposición de la hojarasca, se midió a través de la MSR en cada tiempo de muestreo, con respecto a la cantidad inicial. Esto se hizo mediante el modelo de descomposición descrito por Olson (1963) (ecuación 1).

$$\frac{X_t}{X_0} = e^{-kt} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: X_t , peso seco del material remanente en un tiempo t (g); X_0 , peso seco inicial (g); k , constante de descomposición y t , tiempo transcurrido (días)

A partir de esta constante, se calculó el tiempo necesario para alcanzar una descomposición de la hojarasca del 50 % ($t_{0,5}$) (ecuación 2) y del 99 % ($t_{0,99}$) (ecuación 3) (Arunachalam & Singh, 2002; Olson, 1963).

$$t_{0,5} = \frac{-0,693}{k} \quad \text{Ec. 2}$$

$$t_{0,99} = \frac{-4,605}{k} \quad \text{Ec. 3}$$

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y modelos lineales generales mixtos (GLM) para cumplir los requisitos de normalidad y homogeneidad de los datos. La primera se probó con gráficos gg, histogramas y gráficos de cajas de residuos; mientras que la homogeneidad de los datos se probó con gráficos de residuos versus datos esperados. Los resultados de producción de hojarasca, aporte potencial de nutrientes y velocidad de descomposición de la hojarasca foliar, se analizaron mediante ANOVA unidireccional con PROC GLM en SAS Enterprise Guide 8.3; se utilizó ANOVA bidireccional para analizar los efectos del sistema, el tiempo y la interacción de los factores simples con el tiempo de evaluación. En todos los casos cuando se observó un nivel de significancia de $(\alpha) \leq 0,05$, se usó separación de medias a través de la prueba de HDS de Tukey.

Resultados

Producción de hojarasca (MS)

Hubo un comportamiento diferencial ($p < 0,05$) entre las especies leñosas perennes presentes en los sistemas silvopastoriles y la pradera de solo gramínea, las especies *G. arborea* y *A. mangium*, fueron las de mayor producción de hojarasca (6938,1 y 5945,5 kg ha⁻¹, respectivamente), seguido de *T. rosea* con 3912,6 kg ha⁻¹ y por último, la gramínea Mulato II (2264,6 kg ha⁻¹) (Figura 1).

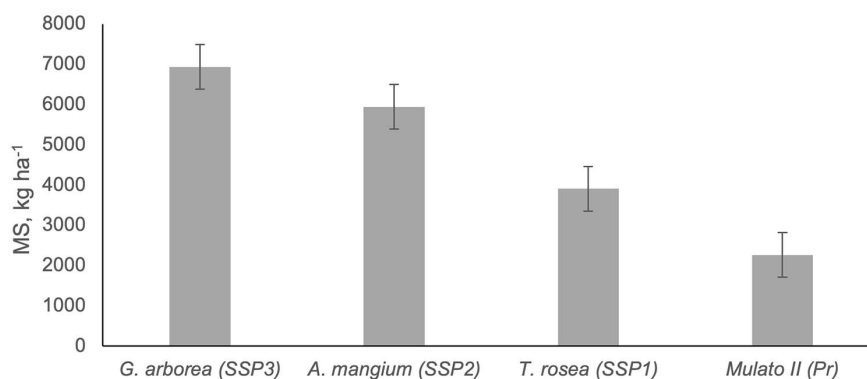


Figura 1. Producción de hojarasca de especies forestales dentro de sistemas silvopastoriles (SSP), y en una pradera de solo la gramínea (*Brachiaria* híbrido cv. Mulato II) (Pr), durante siete meses (mayo a noviembre). Centro de investigación Turipaná de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Figure 1. Leaf litter production of forest species within silvopastoral systems (SSP), and in a meadow of only grass (*Brachiaria* hybrid cv. Mulato II) (Pr), for seven months (May to November). Turipana Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) en la interacción de especies dentro de los SSP y los periodos de evaluación. La producción de materia seca de hojarasca (MS) de las especies vegetales dentro de los tratamientos evaluados (Cuadro 1), registró tendencias similares en las curvas de producción de MS entre la gramínea Mulato II y *T. rosea*, presentó un comportamiento creciente hasta el mes de octubre (617,22 kg ha⁻¹ y 1459,16 kg ha⁻¹, respectivamente) y disminuyó en el mes de noviembre (Cuadro 2). La especie *G. arborea* mostró comportamiento diferencial en la producción de MS respecto a las otras especies a partir del mes de junio, con tendencia creciente hasta el mes de septiembre (1943,69 kg ha⁻¹), fue el mayor valor de MS registrado durante el periodo de evaluación. Para el caso de la especie *A. mangium* no se obtuvo comportamiento definido con pico de producción en el mes de julio (1484,25 kg ha⁻¹) (Cuadro 2).

Aporte potencial de nutrientes

El aporte potencial de nutrientes de la hojarasca foliar (HF) mostró comportamiento diferencial ($p < 0,01$) entre las especies dentro de los SSP y la pradera de solo gramínea (Pr). Los mayores aportes de nutrientes carbono (C), nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), se relacionaron con las especies leñosas perennes presentes dentro de los sistemas silvopastoriles (SSP). Además, se evidenció un patrón de aporte potencia de nutrientes, para el caso de las especies perennes $Ca > N > K > Mg > P$ y en la gramínea fue $K > N > Ca > Mg > P$ (Cuadro 3).

Cuadro 2. Producción promedio mensual de hojarasca en tres especies forestales en sistemas silvopastoriles y en una pastura sin árboles. Centro de investigación Turipana de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Table 2. Average monthly leaf litter production in three perennial woody species in silvopastoral systems and in a treeless pasture. Turipana Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Especie/ arreglos	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	TOTAL
<i>Brachiaria</i> híbrido cv. Mulato II (Pr)	159,5 ab	220,3 b	354,0 c	193,1 b	473,4 b	617,2 c	246,8 b	2264,5 c
<i>T. rosea</i> (SSP1)	34,9 b	151,2 b	168,6 c	267,2 b	576,3 b	1459,1 ab	1254,8 a	3912,4 bc
<i>A. mangium</i> (SSP2)	208,3 a	964,4 a	1484,2 a	768,4 a	459,3 b	969,7 bc	1090,9 a	5945,4 ab
<i>G. arborea</i> (SSP3)	248,2 a	482,8 b	793,9 b	823,6 a	1943,6 a	1715,1 a	930,5 a	6938,1 a
C.V. (%)	32,5	35,2	16,35	20,5	28,6	20,7	22,7	17,38
R ²	0,844	0,89	0,97	0,93	0,92	0,85	0,88	0,9
Sig.	0,0049	0,0010	0,032	0,034	0,021	0,00001	0,015	

Medias que tienen la misma letra es no significativa; Sig.: significación; C.V.: coeficiente de variación; R²: coeficiente de determinación. / Means following of the same letter are not significant; Sig.: significance; C.V.: coefficient of variation; R²: coefficient of determination.

Cuadro 3. Aporte potencial de nutrientes de la hojarasca de especies leñosas perennes presentes dentro de tres sistemas silvopastoriles y una gramínea sin árboles (kg ha⁻¹) durante un umbral de tiempo de siete meses (mayo a noviembre). Centro de investigación Turipana de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Table 3. Potential nutrient contribution from the leaf litter of perennial woody species presents within three silvopastoral systems and one treeless grass (kg ha⁻¹) during a time threshold of seven months (may to november). Turipana Research Center of the Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Especies/arreglos	C	N	P	Ca	K	Mg
	kg ha ⁻¹					
<i>T. rosea</i> (SSP1)	2361,2 b	38,75 b	5,48 b	48,54 b	22,31bc	12,14 b
<i>G. arborea</i> (SSP3)	4069,6 a	62,46 a	14,57 a	96,47 a	37,48 a	23,60 a
<i>A. mangium</i> (SSP2)	3938,4 a	70,77 a	3,57 b	41,63 b	32,116a	14,87 b
<i>Brachiaria</i> híbrido cv. Mulato II (Pr)	1397,8 b	9,97 c	5,66 b	9,75 c	14,50c	6,12 c
CV. (%)	17,14	16,27107	20,75976	17,79191	18,78372	14,07691
Sig.	0,0043	0,0006	0,0013	0,0004	0,01	0,0022

Medias que tienen la misma letra son no significativas; Sig.: significación; CV.: coeficiente de variación. / Means following of the same letter are not significant; Sig.: significance; CV.: coefficient of variation.

Carbono (C)

Los mayores aportes potenciales de carbono (C) se evidenciaron en las especies leñosas perennes *G. arborea*, *A. mangium* y *T. rosea* (4069,6, 3938,4 y 2361,2 kg ha⁻¹, respectivamente) (Cuadro 3). Los aportes potenciales de C vía hojarasca de las especies *G. arborea* y *A. mangium* fueron significativamente mayores a los de la especie *T. rosea* y la gramínea Mulato II. Las especies leñosas perennes aportaron entre 1,69 (*T. rosea*) a 2,91 (*G. arborea*) veces más carbono que la gramínea (Cuadro 3).

Nitrógeno (N)

Se registró comportamiento diferencial ($p=0,0006$) en el aporte potencial del nitrógeno (N) entre especies, resaltaron *A. mangium* y *G. arborea*, las cuales obtuvieron los mayores contenidos ($70,77$ y $62,46$ kg ha^{-1} respectivamente), seguidas de *T. rosea* y Mulato II ($38,75$ y $9,97$ kg ha^{-1} , respectivamente) (Cuadro 3).

Fósforo (P)

La especie *G. arborea* mostró comportamiento diferencial ($p=0,0013$) en el aporte potencial de fósforo (P) frente las otras especies vegetales evaluadas. El mayor valor de fósforo en hojarasca se obtuvo en la especie *G. arborea* ($14,57$ kg ha^{-1} P), seguido de gramínea Mulato II ($5,66$ kg ha^{-1} P), *T. rosea* y *A. mangium*, las cuales mostraron resultados similares.

Calcio (Ca) y magnesio (Mg)

Los resultados indican que los aportes potenciales de los elementos Ca y Mg vía hojarasca foliar (HF), presentaron comportamiento similar dentro de los sistemas silvopastoriles, pero diferencial ($p<0,05$) respecto a los contenidos aportados por la HF de la gramínea Mulato II (Cuadro 2). Los resultados del aporte potencial del Ca, evidenciaron que la HF de la especie *G. arborea* presentó el contenido más alto de Ca ($96,47$ kg ha^{-1}), seguido de *T. rosea* y *A. mangium* con $48,54$ y $41,63$ kg ha^{-1} , respectivamente, con reducción de más 4,3 veces en el aporte potencial de este nutriente respecto a la gramínea sin árboles (Mulato II, $9,75$ kg ha^{-1}). Comportamiento similar al Ca registró el magnesio (Mg), donde el mayor aporte potencial se registró en la especie *G. arborea* ($23,5$ kg ha^{-1}) (Cuadro 2).

Potasio (K)

El aporte potencial de K a través de la hojarasca, mostró comportamiento similar al del nitrógeno y carbono. Los resultados mostraron que las especies forestales *G. arborea* y *A. mangium* registraron los mayores contenidos de potasio con $37,47$ kg ha^{-1} y $32,11$ kg ha^{-1} , respectivamente. Mostró así, diferencias significativas con las especies *T. rosea* y la gramínea Mulato II ($22,31$ y $14,5$ kg ha^{-1} , respectivamente).

Relación C/N

Se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$) en la relación C/N entre las especies leñosas perennes dentro de los SSP y la gramínea sin árboles (Mulato II). La mayor relación C/N (140) se dio en la gramínea (Mulato II), en tanto que la hojarasca de las especies leñosas perennes (forestales) *G. arborea*, *T. rosea* y *A. mangium* presentaron en orden descendente los menores valores en la relación C/N (65 , 60 y $55,6$) (Figura 2A).

Relación N/P

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que las especies leñosas perennes (forestales) dentro de los sistemas silvopastoriles obtuvieron mayor relación N/P respecto a la pradera Mulato II. El mayor valor obtenido fue para la especie *A. mangium* con $19,83$, seguido de *T. rosea* con $7,07$, *G. arborea* con $4,29$ y por último, la gramínea (Mulato II) con un valor de $1,76$ (Figura 2B).

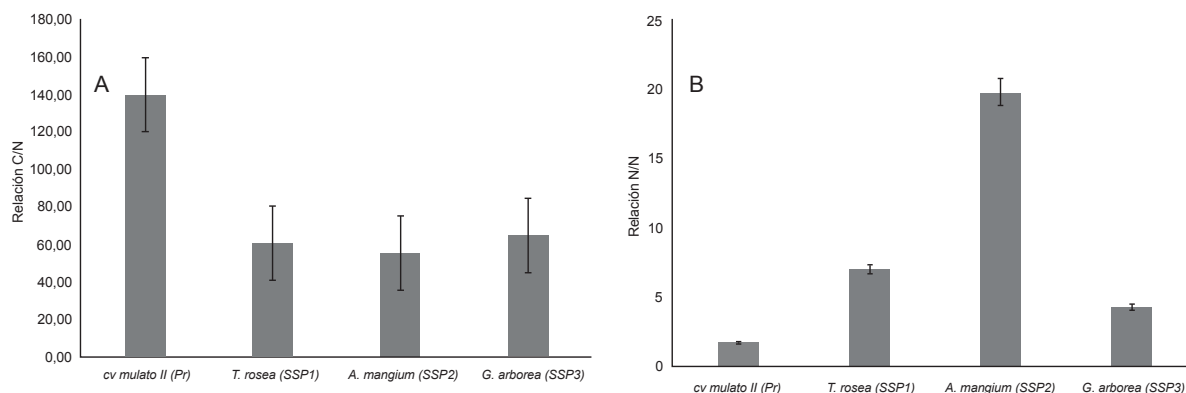


Figura 2. Relaciones carbono - nitrógeno (A) y nitrógeno – fósforo (B), en aporte de nutrientes de hojarasca foliar de especies forestales (*Gmelina arborea*, *Tabebuia rosea*, *Acacia mangium*) dentro de los sistemas silvopastoriles (SSP) y de una gramínea (*Brachiaria* híbrido cv. Mulato II) en una pradera sin árboles. Centro de Investigación Turipana de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Figure 2. Carbon - Nitrogen (A) and Nitrogen – Phosphorus (B) relationships in the return of nutrient supply of leaf litter of forest species (*Gmelina arborea*, *Tabebuia rosea*, *Acacia mangium*) forestals within silvopastoral systems (SSP) and of a grass (*Brachiaria* hybrid cv. Mulato II) in a treeless meadow. Turipana Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Velocidad de descomposición de la hojarasca

La masa seca residual (MSR) mostró comportamiento diferencial ($p < 0,0001$) en la interacción entre los periodos de evaluación y especies vegetales evaluadas (tres especies forestales y una gramínea). La gramínea cv. Mulato II mostró el menor valor promedio de MSR (0,61), seguido de *G. arborea* (0,63). Las otras dos especies forestales (*T. rosea* y *A. mangium*) obtuvieron los mayores valores promedios de MSR (0,70 y 0,77).

La MSR en el día 30 fluctuó entre 0,8 (cv. Mulato II) y 0,87 (*A. mangium*), lo que indicó una pérdida de material inicial del 20 % y 13 %, respectivamente, lo cual no registró diferencias estadísticas significativas entre las especies vegetales evaluadas en esa fracción de tiempo ($p > 0,05$). A partir de los 90 días, se observó comportamiento diferencial ($p < 0,05$) entre las especies vegetales con una MSR en rango de variación de 0,72 (*T. rosea* y *G. arborea*) a 0,79 (*A. mangium*), con pérdida de peso entre 28 y 21 %, respectivamente. *G. arborea*, fue la especie con mayor porcentaje de pérdida estimada. A los 150 días se observó que el cv. Mulato II mostró la menor MSR acumulada, lo que indica una pérdida de más del 52 % del material particulado inicial, seguido de las especies *G. arborea* (46 %) y *T. rosea* (42 %).

Los menores valores de MSR se evidenciaron entre los periodos de 150 y 210 días en las especies vegetales evaluadas. De manera que la especie *A. mangium* y *T. rosea*, al final del periodo de evaluación presentaron los mayores valores con más del 50 % de MSR del material inicial. Contrario a lo obtenido en la gramínea cv. Mulato II y la especie leñosa perenne *G. arborea* con menos del 70 % del material inicial, la gramínea fue la de menor contenido de material particulado al final de la evaluación (Figura 3).

La hojarasca de la gramínea cv Mulato II exhibió tasa de descomposición significativamente mayor ($p < 0,001$) que las especies *T. rosea* y *A. mangium* (Cuadro 4). La tasa de descomposición anualizada (k) para la especie cv. Mulato II fue de 2,07, seguida de la leñosa perennes *G. arborea* (1,95), mientras que, para las especies *T. rosea* y *A. mangium* fue de 1,09 y 0,85, respectivamente, esta última especie leñosa fue la de menor tasa de descomposición (Cuadro 4).

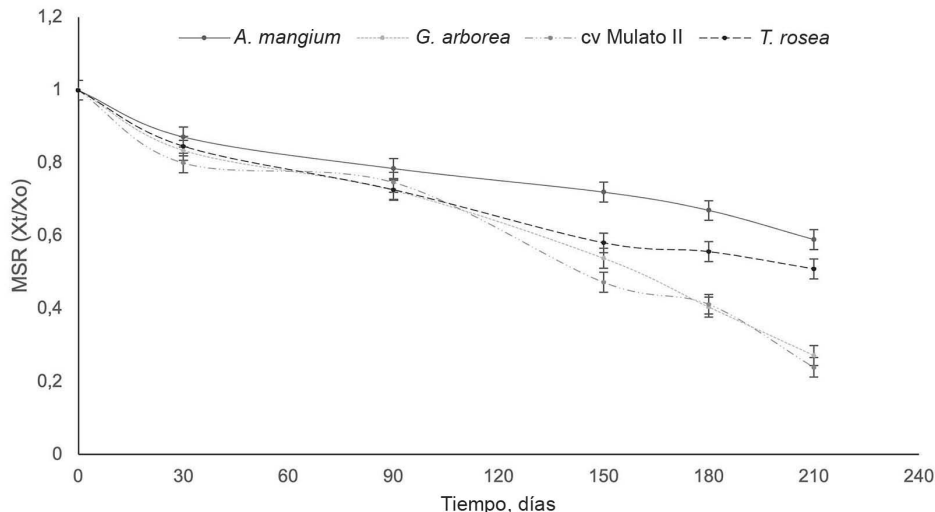


Figura 3. Masa seca residual (X_t / X_o) de la hojarasca foliar de especies forestales dentro de sistemas silvopastoriles y de una pradera de solo gramínea (*Brachiaria* híbrido cv. Mulato II), en un periodo de siete meses (mayo a noviembre). Centro de investigación Turipana de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Figure 3. Residual dry mass (X_t / X_o) of the leaf litter of perennial woody species (forest) within silvopastoral systems and of a meadow with only grass (*Brachiaria* hybrid cv. Mulato II) in a period of seven months (May to November). Turipana Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Cuadro 4. Modelo de descomposición ajustado para la materia seca residual (MSR) de la hojarasca foliar de las especies presentes en los sistemas silvopastoriles y la gramínea sin árboles durante el periodo de mayo a noviembre de 2013. Centro de investigación Turipana de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Cereté, Córdoba, Colombia. 2013.

Table 4. Decomposition model adjusted for the residual dry matter (MSR) of the leaf litter of the species present in the silvopastoral systems and the grass without trees during the period from May to November 2013. Turipana Research Center of the Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Cerete, Cordoba, Colombia. 2013.

Especies/arreglos	Modelo (X_t/X_o)	k (año ⁻¹)	t _{0,5} (años)	t _{0,99} (años)	R ² (%)
<i>T. rosea</i>	$e^{(-0,003t)}$	1,09 a	0,63 a	4,20 a	98,6
<i>A. magium</i>	$e^{(-0,0023t)}$	0,85 a	0,84 a	5,60 a	95,0
<i>G. arbórea</i>	$e^{(-0,0053t)}$	1,95 b	0,38 b	2,49 b	94,3
<i>Brachiaria</i> híbrido cv. mulato II	$e^{(-0,0056t)}$	2,07 b	0,34b	2,28 b	90,0

X₀: cantidad inicial de material (g), X_t: cantidad de material remanente en un tiempo t, k: tasa de descomposición anualizada, t_{0.5}: tiempo necesario para alcanzar la descomposición del 50 % de la hojarasca foliar, t_{0.99}: tiempo necesario para alcanzar la descomposición del 99 % de la hojarasca foliar, R²: coeficiente de determinación. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre especies (p<0,05, prueba de Tukey). / X₀: initial amount of material (g), X_t: amount of material remaining in a time t, k: annual decomposition rate, t_{0.5}: time necessary to reach 50 % decomposition of the leaf litter, t_{0.99}: time necessary to reach the decomposition of 99 % of the leaf litter, R²: coefficient of determination. Different letters denote significant differences between species (p<0.05, Tukey's test).

De acuerdo con los valores obtenidos para las tasas de descomposición (k) de las especies vegetales evaluadas, se puede la siguiente secuencia decreciente:

$$\text{cv. Mulato II} \approx G. \text{arbórea} \approx T. \text{rosea} > A. \text{mangium}$$

Se pudo observar que el tiempo requerido para que la HF alcanzara el 50 % ($t_{0,5}$) y 99 % ($t_{0,99}$) en descomponerse, mostró un comportamiento diferencial ($p < 0,05$) entre las especies presentes en los SSP y la gramínea sin árboles. Estos dos parámetros mostraron comportamiento similar en las especies vegetales cv. Mulato II y *G. arbórea* y comportamiento diferencial frente a las especies *T. rosea* y *A. mangium* (Cuadro 4). Lo que indica que para que la gramínea se descomponga en un 99 % se requiere 27,36 meses y para el caso de la especie leñosa perenne *A. mangium* 67,2 meses ($\approx 2,46$ veces).

El análisis de correlación entre MSR y la composición química de la hojarasca (HF), detectó correlación inversa y significativa entre la relación C/N y MSR ($r = -0,67$; $p < 0,05$) y correlación positiva altamente significativa entre la MSR y la relación N/P ($r = 0,87$; $p = 0,0002$).

Discusión

La mayor producción de hojarasca foliar (HF) dentro de los sistemas silvopastoriles se registraron en las especies leñosas perennes (forestales), en contraste con la pradera de cv. Mulato II (Figura 1). Estos resultados coinciden con lo reportado por Sánchez Fonseca et al. (2008), con valores de producción de HF de 7301,6 kg ha⁻¹ y 4547,3 kg ha⁻¹ en especies *Gmelina arborea* y *Tabebuia rosea*, respectivamente. Además, se reportó una producción anual de HF en un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala* y *Panicum maximum*, de 9100 kg ha⁻¹ y 3400 kg ha⁻¹, respectivamente (Sánchez et al., 2007).

El mayor aporte potencial de nutrientes (N, K, Ca y Mg), se pudo evidenciar en las especies leñosas perennes (forestales) *Gmelina arborea*, *A. mangium* y *T. rosea* (Cuadro 2). Otros autores han reportado que las especies leñosas perennes aportan potencialmente mayor cantidad de nutrientes (C, N, P, K, Ca y Mg) al suelo, señalan que la cantidad de nutrientes contenidos en la HF determina los retornos de nutrientes al sistema (Arcos Alcívar & Jaimez, 2020; López-Hernández et al., 2013; Martínez et al., 2014; 2020) y mejora la dinámica microbiana (Mukhopadhyay & Joy, 2016), por lo que puede atribuirse que el suelo bajo los sistemas silvopastoriles presenta mayor concentración de nutrientes que el de una gramínea sin árboles.

La fase inicial de descomposición de la hojarasca se caracterizó por una rápida pérdida del material inicial de las especies evaluadas. Esto favorece la liberación de nutrientes (C, N, P, K, Ca y Mg) a medida que el tiempo de exposición del material en el suelo aumenta. La velocidad de descomposición y el aporte de nutrientes dependió de la naturaleza y composición de la especie vegetal, a las condiciones de cada sitio como el microclima, condiciones de humedad y biota del suelo (Castellanos-Barliza & León Peláez, 2011; Cesarz et al., 2016; Djukic et al., 2018; Peña-Peña & Irmiler, 2016).

Los mayores contenidos de masa seca residual (MSR) se encontraron en las especies *A. mangium* y *T. rosea*, lo cual indica una menor descomposición de la hojarasca (Figura 3). Esto contrasta con la relación C/N registrada, la cual no define la descomposición de la HF en este caso y en otros estudios (Castellanos-Barliza & León Peláez, 2011; Güsewell & Gessner, 2009), esto pudo estar asociado a los no muy bajos contenidos de N en la HF y su efecto limitante en la actividad de los descomponedores (Bahamonde et al., 2012).

La relación N/P, en esta investigación muestran que las especies leñosas perennes (forestales) presentes dentro de los sistemas silvopastoriles obtuvieron una mayor relación N/P e indica deficiencia de P, con relación a la

pradera Mulato II (Figura 2B). Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores, quienes afirman que relación N/P bajas aumentan la velocidad de descomposición, relacionado con condiciones adecuadas para que los organismos descomponedores (hongos y bacterias) puedan realizar su actividad (Berg & Laskowski, 1997; Flórez-Flórez et al., 2013; Prescott, 2005). El fósforo juega un papel importante como regulador de la descomposición de la hojarasca, pues se ha detectado que las especies arbóreas tienden a retrasarlo desde las hojas senescentes y evitar así la pérdida de este nutriente (Martínez-Atencia et al., 2020). Al parecer el bajo contenido de este nutriente (P) y la relación N/P determinaron en mayor medida la velocidad de descomposición y liberación de nutrientes, que la cantidad de nitrógeno (N) y la relación C/N.

Conclusiones

La implementación de especies arbóreas leñosas dentro de sistemas de producción ganaderos, contribuyeron a aumentar el aporte de hojarasca foliar al suelo, en comparación con una pradera de solo gramínea.

Las especies leñosas aportaron mayor cantidad de nutrientes (N, K, Ca y Mg) al suelo por medio de la producción de hojarasca foliar (HF), con un mayor retorno de nutrientes al sistema.

La disponibilidad de potencial de nutrientes en el suelo depende de la velocidad de descomposición de las especies presentes dentro de los sistemas. La especie *Gmelina arborea* presentó los mayores aportes de producción de hojarasca foliar (HF), mayor contenido de nutrientes y mayor velocidad de descomposición.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo financiero del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, dentro del proyecto “Modelos agroforestales y silvopastoriles diseñados, incluyendo el uso de maderas finas”, liderado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Referencias

- Arcos Alcívar, F., & Jaimez, R. E. (2020). Aporte de nutrientes por caída de hojarasca en plantaciones de *Tectona grandis* (Teca) en períodos de sequía. *NOVASINERGIA Revista Digital de Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, 3(1), 17–26. <https://doi.org/10.37135/ns.01.05.02>
- Arunachalam, A., & Singh, N. D. (2002). Leaf litter decomposition of evergreen and deciduous *Dillenia* species in humid tropics of North-East India. *Journal of Tropical Forest Science*, 14(1), 105–115. <https://www.jstor.org/stable/43596211>
- Bahamonde, H. A., Peri, P. L. P., Alvarez, R., Barneix, A., Moretto, A., & Martínez Pastur, G. (2012). Litter decomposition and nutrients dynamics in *Nothofagus antarctica* forests under silvopastoral use in Southern Patagonia. *Agroforestry Systems*, 84, 345–360. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9479-7>
- Barragán-Hernández, W. A., Mahecha-Ledesma, L., & Cajas-Jirón, Y. S. (2015). Variables fisiológicas-metabólicas de estrés calórico en vacas bajo silvopastoreo y pradera sin árboles. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 211–223. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19277>
- Berg, B., & Laskowski, R. (1997). Changes in nutrient concentrations and nutrient release in decomposing needle litter in monocultural systems of *Pinus contorta* and *Pinus sylvestris*—a comparison and synthesis. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12(2), 113–121. <https://doi.org/10.1080/02827589709355392>

- Bradford, M. A., Veen, G. F., Bonis, A., Bradford, E. M., Classen, A. T., Cornelissen, J. H. C., Crowther, T. W., De Long, J. R., Freschet, G. T., Kardol, P., Manrubia-Freixa, M., Maynard, D. S., Newman, G. S., Logtestijn, R. S. P., Viketoft, M., Wardle, D. A., Wieder, W. R., Wood, S. A., & van der Putten, W. H. (2017). A test of the hierarchical model of litter decomposition. *Nature Ecology & Evolution*, *1*(12), 1836–1845. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0367-4>
- Buitrago-Guillen M. E., Ospina-Daza L. A., & Narváez-Solarte W. (2018). Sistemas silvopastoriles: alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, *22*(1), 31–42. <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/boletincientifico/article/view/2724>
- Cajas-Girón, Y. S., Barragán Hernández, W. A., Arreaza-Tavera, L. C., Argüelles-Cárdenas, J., Amézquita-Collazos, E., Abuabara-Pérez, Y., Panza-Tapia, B., & Lascano-Aguilar, C. (2013). Efecto sobre la producción de carne de la aplicación de tecnologías de renovación de praderas de *Bothriochloa pertusa* (L.) A. Camus en la Costa Norte Colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *13*(2), 213–218. <http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/259>
- Castellanos-Barliza, J., & León Peláez, 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. <https://doi.org/10.15517/rbt.v59i1.3182>
- Cesarz, S., Craven, D., Dietrich, C., & Eisenhauer, N. (2016). Effects of soil and leaf litter quality on the biomass of two endogenic earthworm species. *European Journal of Soil Biology*, *77*, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.09.002>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., & Fallas-Guzmán, C. K. (2019). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*, *44*(1), 29–41. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Djukic, I., Kepfer-Rojas, S., Schmidt, I. K., Larsen, K. S., Beier, C., Berg, B., & Alatalo, J. (2018). Early stage litter decomposition across biomes. *Science of the Total Environment*, *628-629*, 1369–1394. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.012>
- 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. <https://doi.org/10.15517/RBT.V61I2.11144>
- Gaspar-Santos, E. S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Álvarez-Solís, J. D. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque (Valdivia)*, *36*(3), 467–480. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300013>
- Güsewell, S., & Gessner, M. O. (2009). N:P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Functional Ecology*, *23*(1), 211–219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01478.x>
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>
- Kalra, Y. P. (1998). Extractable chloride, nitrate, orthophosphate, potassium, and sulfate-sulfur in plant tissue: 2 % acetic and extraction. In Y. P. Kalra (Eds.), *Handbook of methods for plant analysis* (pp. 115–118). Taylor and Francis Group.
- López-Hernández, J. M., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Pando-Moreno, M., & Estrada-Castillón, A. E. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, *35*, 41–64. <http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n35/n35a3.pdf>

- 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*, 2014(2), Article 359736. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Martínez-Atencia, J., Loaiza-Usuga, J. C., Osorio-Vega, N. W., Correa-Londoño, G., & Casamitjana-Causa, M. (2020). Leaf litter decomposition in diverse silvopastoral systems in a neotropical environment. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), 710–729. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1723112>
- Moreno Valdez, M. E., Domínguez Gómez, T. G., Alvarado, M. D. S., Colín, J. G., Corral Rivas, S., & González Rodríguez, H. (2018). Aporte y descomposición de hojarasca en bosques templados de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 70–93. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.180>
- Mukhopadhyay, S., & Joy, V. C. (2016). Influence of leaf litter types on microbial functions and nutrient status of soil: Ecological suitability of forest trees for afforestation in tropical laterite wastelands. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(12), 2306–2315. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.007>
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44(2), 322–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *El trabajo de la FAO sobre el cambio climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. <http://www.fao.org/3/a-i5165s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. FAO, & PNUMA. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Pascual-Córdova, G., Obrador-Olán, J. J., Carrillo-Ávila, E., García-López, E., Sánchez-Soto, S., Guerrero-Peña, A., & Ortiz-García, C. F. (2017). Indicadores de calidad del suelo en el agroecosistema caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 35(1), 1–25. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27258>
- Peña-Peña, K., & Irmeler, U. (2016). Moisture seasonality, soil fauna, litter quality and land use as drivers of decomposition in Cerrado soils in SE-Mato Grosso, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 107, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.007>
- Portilla Pinzón, D., Barragán Hernández, W. A., Carvajal Bazurto, C. T., Cajas Girón, Y. S., & Rivero Espitia, S. T. (2015). *Establecimiento de sistemas silvopastoriles para la región Caribe*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12655>
- Prescott, C. E. (2005) Decomposition and mineralization of nutrients from litter and humus. In H. BassiriRad (Ed.), *Nutrient acquisition by plants* (Vol. 181, pp. 15–41). Springer Berlin. https://doi.org/10.1007/3-540-27675-0_2
- Rutherford, P. M., McGill, W. B., Arocena, J. M., & Figueredo, C. (2008). Total nitrogen. In M. R. Carter, & E. G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and methods of analysis* (2nd ed.; Chapter 22; pp. 239–250). Taylor & Francis Group, LLC.
- Sánchez, S., Crespo, G., & Hernández, M. (2007). Acumulación de hojarasca en un pastizal de *Panicum maximum* y en un sistema silvopastoril de *Panicum maximum* y *Leucaena leucocephala*. *Pastos y Forrajes*, 30(3), 357–371. <https://bit.ly/3RTHsQa>
- Sánchez Fonseca, C., Lama, D., & Suatunce Cunuhay, P. (2008). Hojas caídas y aporte de nutrientes de diez especies forestales tropicales. *Ciencia y Tecnología*, 1(2), 73–78. <https://doi.org/10.18779/cyt.v1i2.72>

- Socarrás, A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36(1), 5-13. <https://bit.ly/3BuMCNa>
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la taxonomía de suelos* (12ª ed.; Trad. C. A. Ortiz-Solorio, M. C. Gutiérrez-Casterona, & E. V. Gutiérrez-Casterona). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. <https://bit.ly/2LxcRts>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Zapata Cadavid A., & Silva Tapasco B. E. (2020). *Sistemas silvopastoriles. Aspectos teóricos y prácticos* (2da ed.). Corporación Autónoma Regional de Risaralda, & Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.