

---

## CAÍDA DE HOJARASCA Y DINÁMICA DE NUTRIENTES EN PLANTACIONES DE *Acacia mangium* (MIMOSACEAE) DE ANTIOQUIA, COLOMBIA.

### Litterfall and Nutrient Dynamics in *Acacia mangium* (Mimosaceae) Forest Plantations of Antioquia, Colombia.

JEINER CASTELLANOS BARLIZA<sup>1</sup>, M.Sc.;

JUAN DIEGO LEÓN PELÁEZ<sup>1</sup>, Ph. D.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación Ecología y Silvicultura de Especies Forestales Tropicales. Medellín, Colombia.

Calle 59A # 63-20, bloque 14-330, Medellín, Colombia.

jeinercast@gmail.com, jdleon@unalmed.edu.co

Presentado 25 de junio de 2006, aceptado 28 de enero de 2010, correcciones 18 de agosto de 2010.

#### RESUMEN

La producción de hojarasca, el retorno y la reabsorción de nutrientes, y la eficiencia en su uso, fueron estudiados durante un año en plantaciones de *Acacia mangium* establecidas en suelos degradados por minería aurífera en la región del Bajo Cauca colombiano. La producción anual de hojarasca fina fue de 10,4 Mg ha<sup>-1</sup> y estuvo dominada por la fracción foliar (54%), seguida del material reproductivo (24%), y en menor proporción por otros restos (6%) y hojas de otras especies (1,5%). Los mayores retornos de materia orgánica y nutrientes se presentaron en los sitios clasificados como de calidad alta, en tanto que la práctica de subsolado del suelo, previo establecimiento de las plantaciones, no mostró efectos significativos sobre estos. La hojarasca foliar mostró una concentración alta de N y consecuentemente, dados los altos valores de producción de esta fracción, un retorno potencial alto de N. El P, con baja concentración foliar y un bajo retorno potencial, además de los altos valores de los índices de eficiencia en su uso y de reabsorción foliar, fue el nutriente más limitante. Los altos valores de producción de hojarasca fina y de retorno potencial de nutrientes determinados en este estudio, muestran que la especie *Acacia mangium* tiene un gran potencial para la recuperación de áreas degradadas, a partir del restablecimiento de los ciclos biogeoquímicos.

**Palabras clave:** *Acacia mangium*, producción de hojarasca, retorno de nutrientes, reabsorción de nutrientes, eficiencia en el uso de nutrientes, dinámica de nutrientes.

#### ABSTRACT

Fine litter production, nutrient return, nutrient resorption, and nutrient use efficiency were studied during one year in *Acacia mangium* forest plantations in mining gold degraded soils at the Bajo Cauca region of Colombia. Annual fine litter production was estimated at

10.4 Mg ha<sup>-1</sup> and it was dominated by the leaf fraction (54%), followed by the reproductive material (24%) and to a lesser proportion by other debris (6%) and other species leaves (1.5%). The highest organic matter and nutrients returns were found on sites classified as high quality. Soil plowing realized previous *Acacia mangium* planting, did not show any significant effect on organic matter and nutrients returns. *A. mangium* leaf litter had a high N concentration and consequently, given the high leaf litter production values, it was found a high N return. By the opposite, leaf litter P content and P returns via litter fall were very low. The high values found for P retranslocation and P use efficiency indexes showed that P was the most limiting nutrient for the species. The high values of fine litter production and nutrient return via leaf litter indicate that *A. mangium* has a great capacity for degraded areas reclamation, as of the restoration of the biogeochemical cycles.

**Key words:** *Acacia mangium*, litter production, nutrient return, Nutrient resorption, nutrient dynamics, nutrient use efficiency.

## INTRODUCCIÓN

En los bosques tropicales la caída de hojarasca fina es uno de los principales procesos que determinan el reciclaje de nutrientes (Norgrove y Hauser, 2000; Kumar y Agrawal, 2001). Ésta representa la mayor ruta de retorno de materia orgánica y nutrientes para la nutrición vegetal y para la fauna del suelo (Proctor *et al.*, 1983; Spain, 1984; Vitousek y Sanford, 1986; Landsberg y Gower, 1997). Sin embargo, para que los nutrientes sean liberados desde la hojarasca proveniente del dosel, deben ocurrir los procesos de descomposición y mineralización. Los nutrientes confinados en la hojarasca foliar constituyen una fuente importante de recursos, por lo que la cuantificación de su producción y naturaleza son cruciales para comprender el ciclaje de nutrientes en los ecosistemas forestales (Zapata *et al.*, 2007). Además de la caída de hojarasca, existen procesos de fuertes implicaciones en la dinámica de nutrientes, caso de la reabsorción de nutrientes foliares, que conduce a una mayor eficiencia en su uso. La mayor eficiencia en el uso de nutrientes (EUN) puede ser el resultado de una mayor fracción de nutrientes reabsorbida desde las partes senescentes de las plantas previa abscisión, o de una mayor cantidad de materia orgánica o carbono fijados por unidad de nutriente utilizado (Hirose, 1975; Vitousek, 1982). A partir de la caracterización de este conjunto de procesos, es posible determinar la potencialidad de empleo de especies forestales para diferentes fines, dentro de los que se destaca la recuperación de áreas degradadas.

En décadas recientes la utilización de la especie *A. mangium*, en programas de restauración de suelos degradados por la minería ha sido fundamental en los trópicos cálidos y húmedos (Tsukamoto y Sabang, 2005; Torres y del Valle, 2007). Entre otras razones para esto se encuentran su rápido crecimiento, una alta productividad y tolerancia a diferentes tipos de suelos (Torres y del Valle, 2007), y la efectividad que muestra en el establecimiento de asociaciones simbióticas con microorganismos del suelo, como hongos micorrícicos (Lim, 1988; Duponnois y Ba, 1999) y bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico. En Colombia la especie se introdujo con fines de aprovechamiento y restauración a comienzos de la década de los noventa, en los departamentos de Córdoba y Antioquia (Torres y del Valle, 2007), y ha mostrado un gran potencial para cumplir no solo con dicho objetivo, sino

además con el de constituirse como una alternativa económica (León *et al.*, 2008). En la región del Bajo Cauca Antioqueño, las plantaciones establecidas con esta especie superan las 700 ha, sin embargo, es muy escaso el conocimiento que se tiene de algunos de sus aspectos de funcionamiento ecosistémico, y queda aún por determinarse la capacidad real de la especie para la recuperación de áreas degradadas como las de esta región.

El objetivo de este estudio fue evaluar en plantaciones de *A. mangium* establecidas sobre suelos degradados por minería de aluvión en la región del Bajo Cauca Antioqueño, la dinámica de nutrientes a través de la caída de hojarasca y la eficiencia en su uso. Estos dos factores permiten valorar la capacidad que tiene la especie para aportar materia orgánica y nutrientes al suelo, y observar su desempeño desde la óptica de un uso económico de nutrientes limitantes para el crecimiento y desarrollo de la vegetación, bajo condiciones edáficas muy desfavorables. La caracterización de estos aspectos permitirá de manera preliminar, calificar el potencial de empleo de la especie bajo esquema de plantaciones forestales, en programas de restauración ecológica. Para esto, se valoraron las tasas de caída de las diferentes fracciones que componen la hojarasca fina, el retorno potencial de nutrientes vía hojarasca foliar, las tasas de reabsorción de nutrientes foliares móviles, y la eficiencia en su uso. Fueron evaluados como factores de incidencia potencial en estos procesos, la calidad del rodal y la práctica de subsolado del suelo, realizada previo establecimiento de las plantaciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en plantaciones de *A. mangium*, establecidas en 1996 por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) para rehabilitar áreas degradadas por procesos ancestrales de extracción del oro en la región del Bajo Cauca Antioqueño, en el municipio de Cáceres, corregimiento El Jardín ( $07^{\circ}45'30,2''$  N -  $75^{\circ}14'26,2''$  W) (Fig. 1). Los valores medios anuales de precipitación y temperatura son 2.771 mm y 28 °C, respectivamente (IGAC, 2007). Los suelos se caracterizan por

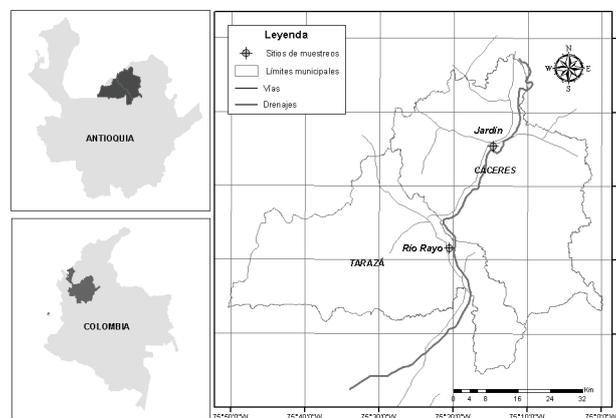


Figura 1. Área de estudio.

Características estructurales de los rodales													
Sitios	N (Individuos ha <sup>-1</sup> )	DAP (cm)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	B (ton ha <sup>-1</sup> )	H (m)							
SA	1133	19,21	32,25	241,13	204,61	21,44							
SB	1026	14,29	16,92	84,68	82,63	12,79							
NA	826	20,48	29,10	211,30	185,81	20,83							
NB	760	13,67	12,30	62,28	58,77	13,28							
Promedio	936	16,91	22,64	149,85	132,96	17,08							

Características químicas de los suelos														
Sitios	pH	MO	N	C	C/N	Ca	Mg	K	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	P
		mg kg <sup>-1</sup>												
		cmol(+) kg <sup>-1</sup>												
		%												
SA	4,5	6,22	0,69	3,60	5,22	5,65	3,28	0,84	0,70	1,42	34,48	41,14	2,45	4,67
SB	4,5	6,06	0,40	3,51	8,78	5,49	3,23	0,85	0,67	1,56	34,32	41,27	2,89	4,04
NA	4,4	5,36	0,40	3,10	7,77	6,41	3,07	0,77	0,67	1,28	28,77	41,60	2,14	7,35
NB	4,6	9,34	0,52	5,41	10,41	8,22	3,56	0,68	0,63	2,40	33,00	42,07	5,99	8,38
Promedio	4,5	6,75	0,50	3,91	8,05	6,44	3,29	0,78	0,67	1,67	32,64	41,52	3,37	6,11

Tabla 1. Características de los rodales de *A. mangium* y de los suelos en los sitios de estudio en el Bajo Cauca Antioqueño. N: densidad G: área basal, DAP: diámetro medido a la altura del pecho (1.3 m), H: altura, V: volumen madera, B: biomasa, pH: determinado en solución suelo-agua 1:2. Tratamientos experimentales: SA: subsolado de alta calidad, SB: subsolado de baja calidad, NA: no subsolado de alta calidad y NB: no subsolado de baja calidad (UNAL-CORANTIOQUIA 2008)

ser ácidos, y presentar bajos contenidos de nutrientes y materia orgánica (UNAL-CORANTIOQUIA, 2008). Previo establecimiento de las plantaciones, algunos terrenos recibieron un tratamiento previo de subsolado, consistente en una práctica de arado superficial realizado con tractor, que permitiera solucionar el problema de fuerte compactación del terreno, mejorando algunas de sus propiedades físicas. Tras el establecimiento de las plantaciones no se desarrolló ningún tipo de actividad silvícola (podas de formación, entresacas, control fitosanitario, fertilización). Los rodales estudiados presentaban un DAP medio de 16,9 cm, una altura media de 17,1 m, y un área basal de 22,6 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (Tabla 1).

#### MÉTODOS DE CAMPO

Se definieron cuatro tratamientos, que describían por una parte el grado de desarrollo de las plantaciones a partir de la fisonomía del vuelo forestal (calidad de la plantación), y por otra, la realización o no del subsolado del terreno previo establecimiento de las plantaciones. Los tratamientos en cuestión fueron: Subsolado de alta calidad (SA), Subsolado de baja calidad (SB), No Subsolado de alta calidad (NA) y No Subsolado de baja calidad (NB) (Tabla 1). Se establecieron 12 parcelas circulares de 250 m<sup>2</sup>, con tres repeticiones por tratamiento. En cada parcela se instalaron nueve trampas para monitorear la caída de hojarasca fina, a una altura aproximada de 1 m desde la superficie del suelo. Las trampas utilizadas consistieron en recipientes circulares de 0,5 m<sup>2</sup>, en tela de malla fina para evitar pérdidas del material más fino (Ramírez *et al.*, 2007). La recolección del material se realizó quincenalmente por un periodo de un año (marzo del 2007 a marzo del 2008).

Para el seguimiento del proceso de reabsorción de nutrientes, se tomaron muestras de hojas maduras de individuos representativos de cada parcela. Las hojas fueron recolectadas mensualmente y seleccionadas con el criterio de que reflejaran un buen estado fotosintético y que estuvieran libres de plagas y enfermedades. El material de las tres parcelas, pertenecientes a cada tratamiento, se combinó y seleccionó una muestra de éste para procesar en laboratorio. La precipitación fue registrada mediante cuatro pluviómetros dispuestos cerca de las plantaciones, los cuales fueron medidos semanalmente en cada sitio. Además, se tomaron muestras de suelo superficial para análisis de fertilidad, como referente para cada tratamiento.

#### MÉTODOS DE LABORATORIO

El material colectado en las trampas fue llevado al Área de Biogeoquímica del Laboratorio de Ecología César A. Pérez Figueroa, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en donde fue separado en varias fracciones: hojas de *A. mangium* (H), hojas de otras especies (OH), material leñoso (L), material reproductivo (MR) y otros restos (OR). El material foliar recogido durante cada mes en cada parcela se combinó, para obtener una muestra compuesta por cada tratamiento, se secó a 65 °C hasta obtener peso seco constante y se molió. Las hojas verdes recibieron igual tratamiento y fueron cosechadas simultáneamente con las de las trampas de hojarasca, con el objetivo de comparar las concentraciones de nutrientes foliares pertenecientes al mismo evento de muestreo. Las hojas fueron molidas y llevadas a cenizas a una temperatura de 600 °C, determinados los contenidos de fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y

potasio (K). El N se determinó por micro-Kjeldahl. Los cationes K, Ca y Mg se determinaron por digestión vía seca y absorción atómica, y el P por digestión ácida y espectrofotometría ultravioleta visible. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas en malla 2,0 mm y sometidas a análisis de fertilidad.

#### ANÁLISIS DE DATOS

Para comparar entre tratamientos la producción de hojarasca, la EUN y el retorno potencial de nutrientes, se realizaron análisis de varianza seguidos de la prueba de Tukey cuando se detectaron diferencias ( $P \leq 0,05$ ). Se calcularon coeficientes de correlación de Pearson para determinar el efecto de la precipitación total sobre la producción de hojarasca. Los retornos de nutrientes por tratamiento fueron calculados a partir de las concentraciones y de los valores de producción de hojarasca. Los análisis se realizaron a través del programa *Statgraphics Centurion XV* (Statistical Graphics Corporation, 2002). Como medida para evaluar la EUN, se utilizó el índice de Vitousek (*IEV*) (Vitousek, 1984), definido como la relación entre el peso seco de la hojarasca y el contenido de nutrientes en ella, o el inverso de la concentración de nutrientes (Ecuación 1).

$$IEV = \frac{\text{producción de hojarasca (kg ha}^{-1}\text{año}^{-1})}{\text{contenido de nutrientes} \times \text{producción de hojarasca (kg ha}^{-1}\text{año}^{-1})} \quad (1)$$

La reabsorción se evaluó empleando el modelo propuesto por Finzi *et al.* (Finzi *et al.*, 2001), que está fundamentado en la relación existente entre los nutrientes presentes en las hojas verdes y en la hojarasca foliar (Ecuación 2).

$$ERN = ((A-B)/A) * 100 \quad (2)$$

Donde ERN: Eficiencia en la reabsorción de nutrientes, A: concentración del nutriente en las hojas verdes (%), y B: Concentración del nutriente en la hojarasca foliar (%)

## RESULTADOS

#### PRODUCCIÓN DE HOJARASCA FINA

La producción anual de hojarasca fina en el área de estudio fue  $10.350 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Tabla 2), con menores valores en los meses más lluviosos (Fig. 1). Entre tratamientos, los mayores valores estuvieron representados por SA y NA (Tabla 2). La caída de hojarasca estuvo dominada por la fracción foliar ( $5.543 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) y el material reproductivo ( $2.462 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). Los menores valores fueron registrados para las fracciones OR y OH ( $577,7$  y  $153,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , respectivamente) (Tabla 2). La producción de hojarasca fina anual no presentó diferencias significativas ( $P=0,21$ ) entre tratamientos (Fig. 2). Sin embargo, para el mes de junio en el mayor pico de producción, se observaron diferencias considerables entre los tratamientos de calidad alta (SA, NA) y los de calidad baja (SB, NB). Por otra parte, no se detectaron correlaciones significativas ( $P > 0,05$ ) entre la precipitación total y los patrones de producción de hojarasca en cada tratamiento. Los coeficientes de variación fueron muy bajos para todas las fracciones en todos los tratamientos, con excepción de la fracción OH (Tabla 2).

Tratamientos	Fracciones					Total
	H	OH	MR	L	OR	
SA	6454,98 (2,17)	30,29 (9,92)	2790,11 (6,37)	2229,26 (6,73)	596,75 (5,03)	12101,39 (3,11)
SB	4520,36 (2,62)	0,57 (20,75)	1811,07 (5,38)	1048,85 (6,40)	446,30 (6,40)	7827,15 (2,75)
NA	5957,14 (2,03)	571,97 (5,00)	2871,94 (5,43)	1893,76 (5,62)	672,66 (4,78)	11967,47 (2,40)
NB	5239,83 (2,43)	10,18 (12,23)	2373,07 (4,59)	1277,88 (6,20)	595,02 (5,32)	9495,97 (2,43)
Promedio	5543,08	153,25	2461,55	1612,44	577,68	10348,00

Tabla 2. Producción anual de hojarasca fina ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) discriminada por fracciones en los diferentes tratamientos establecidos en las plantaciones de *A. mangium* del Bajo Cauca Antioqueño.

Valores entre paréntesis representan el coeficiente de variación (%). H: hojas de *A. mangium*, OH: hojas de otras especies, L: material leñoso, MR: material reproductivo, OR: otros restos.

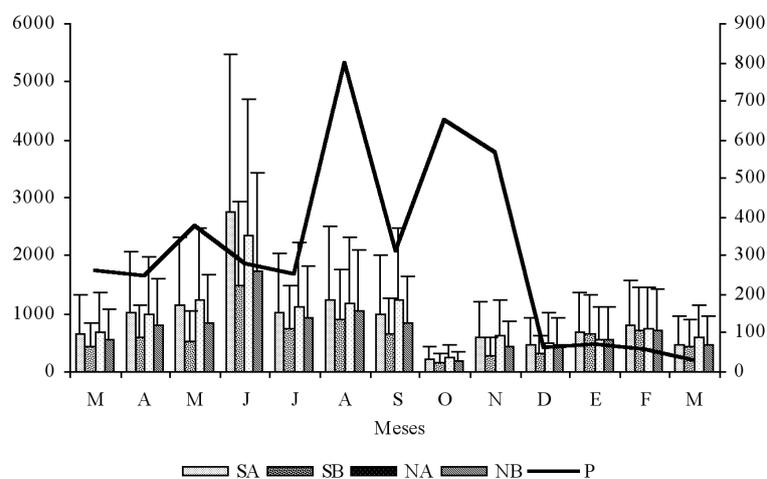


Figura 2. Valores medios de precipitación mensual (P) y de producción de hojarasca fina en los tratamientos experimentales establecidos en las plantaciones de *Acacia mangium* del Bajo Cauca Antioqueño. Las barras representan la desviación estándar.

#### RETORNO POTENCIAL DE NUTRIENTES VÍA HOJARASCA FOLIAR

La hojarasca foliar de *A. mangium* estuvo caracterizada en todos los tratamientos por altos contenidos de N y bajos contenidos de P (Tabla 3). Los mayores valores de N y P fueron registrados para NA (1,32%) y SA (0,012%), respectivamente. Los menores valores de ambos nutrientes fueron observados en SB (N: 1,16% y P: 0,007%). Las concentraciones de P entre tratamientos mostraron diferencias significativas ( $P=0,0001$ ) entre los grupos SA, NA y SB, NB. El coeficiente de variación de las concentraciones de P fue mayor en los sitios subsolados (SA, SB), que en los no subsolados (NA, NB). Las concentraciones de N mostraron coeficientes de variación relativamente bajos entre tratamientos (Tabla 3). Por otra parte, las concentraciones de Ca, Mg y K decrecieron

considerablemente desde septiembre y aumentaron gradualmente hasta febrero, tendencia correspondiente a la transición de los periodos más lluviosos a los más secos (Fig. 3). Las concentraciones de N y P mostraron tendencias constantes en todos los tratamientos; sin embargo, se observaron picos de concentración de N en septiembre, coincidiendo con la disminución de las lluvias (Fig. 2). La concentración de P presentó picos durante junio y septiembre, más evidentes para el tratamiento SA, los cuales también correspondieron a periodos de menor precipitación.

Concentración de nutrientes (%)					
Tratamientos	P	N	Ca	Mg	K
SA	0,012±0,005 b (40,86)	1,245±0,148 a, b (11,86)	0,511±0,152 a (29,68)	0,131±0,031 a (23,54)	0,147±0,054 a (36,78)
SB	0,007±0,002 a (23,35)	1,158±0,095 a (8,22)	0,493±0,152 a (30,83)	0,118±0,027 a (23,01)	0,141±0,075 a (53,10)
NA	0,011±0,002 b (16,95)	1,316±0,131 b (9,94)	0,489±0,138 a (28,23)	0,123±0,030 a (24,40)	0,203±0,075 a (36,85)
NB	0,009±0,001 a (16,82)	1,249±0,121 a, b (9,72)	0,525±0,167 a (31,78)	0,121±0,026 a (21,36)	0,164±0,059 a (35,89)
Promedio	0,010	1,242	0,505	0,123	0,164
Retorno de nutrientes (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )					
Tratamientos	P	N	Ca	Mg	K
SA	0,8±0,036 a, c (4,76)	80,5±2,790 a (3,46)	35,1±1,623 a (4,62)	8,9±0,360 a (4,06)	9,9±0,418 a (4,21)
SB	0,3±0,012 b (3,82)	52,2±1,576 a (3,02)	23,9±1,121 a (4,69)	5,6±0,213 a (3,81)	7,0±0,411 a (5,89)
NA	0,7±0,025 a, c, d (3,80)	78,0±2,416 a (3,09)	31,4±1,486 a (4,74)	7,7±0,319 a (4,16)	12,8±0,548 a (4,29)
NB	0,5±0,015 b, d (3,32)	65,8±2,031 a (3,08)	29,7±1,444 a (4,86)	6,6±0,244 a (3,72)	9,3±0,421 a (4,51)
Promedio	0,5	69,1	30,0	7,2	9,7

Tabla 3. Valores medios de concentración de nutrientes foliares (% ± DS) y flujo anual de nutrientes vía hojarasca foliar (kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ± DS) en los tratamientos establecidos en las plantaciones de *A. mangium* del Bajo Cauca Antioqueño

Valores entre paréntesis representan el coeficiente de variación (%). DS: desviación estándar. Para cada nutriente, letras diferentes muestran diferencias significativas (P<0,05), y letras iguales denotan diferencias no significativas entre las medias de los tratamientos. SA: subsolado de alta calidad, SB: subsolado de baja calidad, NA: no subsolado de alta calidad y NB: no subsolado de baja calidad.

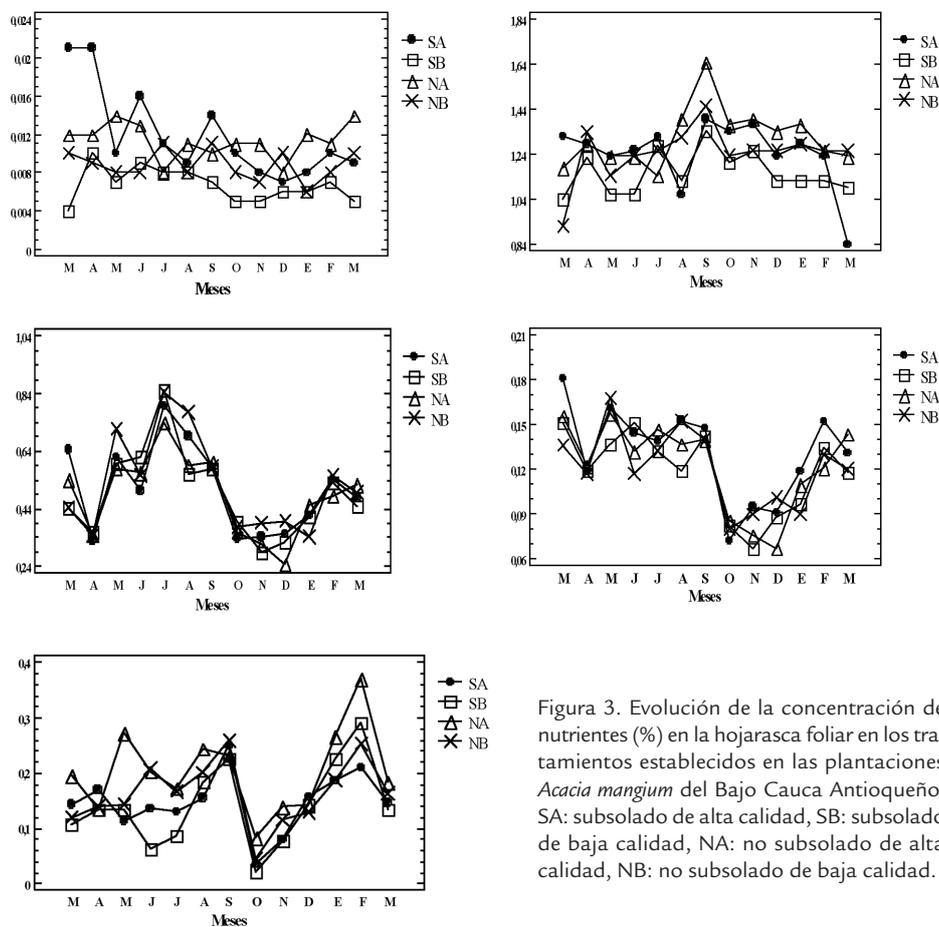


Figura 3. Evolución de la concentración de nutrientes (%) en la hojarasca foliar en los tratamientos establecidos en las plantaciones *Acacia mangium* del Bajo Cauca Antioqueño. SA: subsolado de alta calidad, SB: subsolado de baja calidad, NA: no subsolado de alta calidad, NB: no subsolado de baja calidad.

Los mayores retornos potenciales medios de nutrientes vía hojarasca foliar, se observaron para N ( $69,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) y para Ca ( $30,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), por el contrario, los menores valores se registraron para P ( $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Diferencias no significativas entre tratamientos fueron observadas en los retornos de N, Ca, Mg y K. Por el contrario, diferencias significativas fueron observadas en los retornos de P entre los grupos SB y SA, NA (Tabla 3).

#### REABSORCIÓN DE NUTRIENTES FOLIARES Y EFICIENCIA EN SU USO

La mayor EUN fue encontrada para P (IEV: 11586,4), y la menor para N (IEV: 81,5), aun por debajo de la de Ca, nutriente de carácter eminentemente inmóvil en la planta. No obstante, los valores ERN para N fueron mayores, indicando una mayor reabsorción. Asimismo, el nutriente más reabsorbido fue P (74,3%) y el Mg el menos móvil (14,1%, Tabla 4). Ambos índices para N, Ca, Mg y K, no mostraron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) entre tratamientos. Los índices para P presentaron diferencias entre tratamientos; éstas se detectaron para el IEV entre los tratamientos de calidad alta (SA, NA) y los de calidad baja (SB NB), mientras que para ERN entre los grupos SA, NA y SB, y entre NA y NB.

IEV					
Tratamientos	P	N	Ca	Mg	K
SA	9651,28 a	81,66 a	212,44 a	811,57 a	859,82 a
SB	15652,74 b	86,85 a	220,08 a	897,57 a	1101,15 a
NA	9139,73 a	76,60 a	223,12 a	875,66 a	564,43 a
NB	11901,79 c	80,92 a	207,41 a	864,08 a	738,13 a
Promedio	11586,38	81,51	215,76	862,22	815,88
ERN					
Tratamientos	P	N	Ca	Mg	K
SA	71,90 a,c	42,33 a	26,97 a	11,69 a	66,35 a
SB	78,34 b	42,70 a	9,83 a	13,17 a	71,34 a
NA	70,41 a	38,21 a	23,91 a	17,51 a	63,99 a
NB	76,41 b,c	38,27 a	20,58 a	14,08 a	72,59 a
Promedio	74,26	40,38	20,32	14,11	68,57

Tabla 4. Valores medios de los índices de eficiencia de Vitousek (IEV) y de eficiencia de la reabsorción (ERN), en los tratamientos establecidos en las plantaciones de *Acacia mangium* del Bajo Cauca Antioqueño.

Letras diferentes denotan diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre los tratamientos IEV: índice de eficiencia en el uso de nutrientes de Vitousek (1984). ERN: índice de eficiencia de la reabsorción (%). SA: subsolado de alta calidad, SB: subsolado de baja calidad, NA: no subsolado de alta calidad y NB: no subsolado de baja calidad.

## DISCUSIÓN

### PRODUCCIÓN DE HOJARASCA FINA

La producción anual de hojarasca fina (Tabla 2) fue alta comparada con la reportada para plantaciones de tierras bajas tropicales (Parrotta, 1999; Goma-Tchimbakala y Bernhard-Reversat, 2006; Barlow *et al.*, 2007). Por otra parte, se localizó dentro del intervalo reportado para plantaciones de la misma especie establecidas sobre suelos pobres y degradados (Lim, 1988; Bernhard-Reversat, 1993). Los más altos valores de producción de hojarasca se presentaron en los tratamientos de calidad alta (SA y NA), en donde además ocurren los mayores valores de área basal y biomasa de los rodales (Tabla 1). Nuestros resultados fueron similares a los de Brown y Lugo (Brown y Lugo, 1982), quienes encontraron una correlación lineal positiva entre la producción de hojarasca total y la biomasa del rodal. Agudelo y Aristizábal, 2003, asimismo encontraron asociación ( $R^2=74\%$ ) entre la biomasa aérea y la caída de hojarasca foliar. Por otra parte, la ausencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos de alta calidad (SA y NA) indicó la poca influencia de la práctica del subsolado sobre la producción de hojarasca fina (Tabla 2). La hojarasca fina total estuvo compuesta mayoritariamente por la fracción foliar (H: 54%), seguida por el material reproductivo (MR: 24%), y en menor proporción por otros restos (OR: 6%) y hojas de especies diferentes a *A. mangium* (OH: 1,5%). Tendencias similares en cuanto a composición de la hojarasca fina han sido reportadas para otras plantaciones y bosques tropicales (Proctor *et al.*, 1983; Weaver *et al.*, 1986; Lim, 1988; Proctor *et al.*, 1989; Veneklaas, 1991; Swamy y Proctor, 1997; Saharjo *et al.*, 2000). Por otra parte, a pesar de la alta producción de

hojarasca registrada en los meses menos lluviosos (marzo-junio de 2007), la precipitación no correlacionó significativamente con la producción de las diferentes fracciones de la hojarasca en ninguno de los tratamientos. Dado que a lo largo del año se tuvo una buena disponibilidad de agua lluvia, aun en los meses más secos, se puede afirmar que en estas plantaciones de *A. mangium* fueron otros los factores que determinaron la caída de hojarasca (edáficos, bióticos y estructurales del rodal: Mall *et al.*, 1991).

#### RETORNO POTENCIAL DE NUTRIENTES VÍA HOJARASCA FOLIAR

Las altas concentraciones foliares de N en la hojarasca reflejaron la capacidad de la especie para asociarse con bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico, dados los bajos contenidos edáficos de N al momento de ser establecidas las plantaciones. Estas concentraciones en la hojarasca foliar, coincidieron en su mayoría con las reportadas para bosques y plantaciones de tierras bajas tropicales (Tabla 5). Sin embargo, fueron bajas comparadas con las registradas por Seneviratne *et al.*, 1998; y por Ngoran, 2006, en plantaciones jóvenes y maduras de *A. mangium* en la India y África, respectivamente. Las concentraciones foliares de P, K, Mg fueron, en general, inferiores a las reportadas para bosques y plantaciones tropicales de tierras bajas (Tabla 5). Esta situación reflejó una baja demanda de nutrientes por la especie y/o su baja disponibilidad en el suelo (Tabla 1). En particular, las bajas concentraciones foliares de P reflejaron su carácter limitante para la nutrición vegetal. De hecho, el valor crítico propuesto por Aerts, 1997, para la relación N/P en la hojarasca foliar (11,9) aquí fue claramente superado (valor medio N/P=124,2), señalando un serio déficit de P. Las concentraciones foliares de P mostraron diferencias entre los grupos de tratamientos SA-NA y SB-NB, indicando la influencia de la calidad de las plantaciones. Para el N fueron observadas diferencias significativas entre los tratamientos SB y NA, no obstante, no fue clara la influencia del subsolado ni de la calidad de las plantaciones (Tabla 3). Entre tratamientos, el K mostró la mayor variabilidad (Tabla 3), como resultado de su carácter móvil, que lo hace fácilmente removible de los órganos foliares por la acción del agua lluvia (Hagen-Thorn *et al.*, 2006). Las concentraciones de N tuvieron mínima variabilidad, lo que implica una mayor estabilidad, y sugieren que su presencia foliar fluctuó en un rango estrecho durante el estudio, como consecuencia de su disponibilidad permanente. Por otra parte, la variabilidad encontrada en las concentraciones foliares de P fue alta, nutriente cuya disponibilidad en el suelo de las plantaciones de *A. mangium* aquí estudiadas fue crítica (Tabla 1). Las concentraciones de nutrientes fueron en general mayores en los meses menos lluviosos (Fig. 2), situación asociada además a los picos de producción de hojarasca.

Los mayores retornos de nutrientes (Tabla 3) se encontraron principalmente en los tratamientos de calidad alta. A pesar de no encontrarse diferencias significativas en los retornos de N, Ca, Mg, K, sí fue evidente la correspondencia de mayores valores en los tratamientos de calidad alta (SA y NA), corroborando un mayor efecto de este parámetro sobre los retornos, que el tratamiento de subsolado. Los retornos de nutrientes tuvieron una baja variabilidad en todos los tratamientos (Tabla 3). Los retornos de N, Ca y K se correspondieron con los reportados para plantaciones y bosques de tierras bajas tropicales. Por el contrario, los retornos de P y Mg presentaron valores inferiores (Tabla 5), reflejando especialmente para el caso del P, su carácter restrictivo para la nutrición vegetal.

Tipo de bosque	Localización	Especies	Nutrientes												Referencia
			N		P		K		Ca		Mg				
			CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN			
Plantación	Luquillo (Puerto rico)	<i>Pinus caribaea</i> , <i>Swietenia mahagoni</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> .	-	14-70	-	1-2	-	3-9	-	-	-	-	-	-	Lugo 1992
	Luquillo (Puerto rico)	<i>Pinus caribaea</i> , <i>Eucalyptus saligna</i> , <i>Eucalyptus</i> cf. <i>Patentinervis</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Terminalia ivorensis</i> .	-	6-94	-	2-4	-	34-45	-	54-111	-	25-38	-	-	Cuevasy Lugo 1998
	Toa Baja (Puerto Rico)	<i>Casuarina equisetifolia</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Eucalyptus robusta</i> ,	0, 79-2,04	42-193	-	1-5	-	14-33	-	85-281	-	17-51	-	-	Parrotta 1999
	Madhya Pradesh (India)	<i>Dalbergia sissoo</i> , <i>Azadirachta indica</i> , <i>Pongamia pinnata</i> , <i>Shorea robusta</i> .	0,7-1,2	8-34	0,04-0,06	1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	Singh et al. 1999
	La Selva (Costa Rica)	<i>Stryphnodendron microstachyum</i> , <i>Vochysia guatemalensis</i> , <i>Jacaranda copaia</i> , <i>Callophyllum brasiliense</i> , <i>guachapele</i> , <i>Virola koschnyi</i> , <i>Terminalia amazonia</i> , <i>Dipteryx panamensis</i>	0,99-4,09	-	0,12-0,75	-	0,35-1,34	-	0,37-1,01	-	0,09-0,40	-	-	-	Montagnini 2000
	Pointe-Noire (Congo)	<i>Eucalyptus tereticornis</i> , <i>Eucalyptus grandis</i>	-	44	-	4	-	12	-	13	-	9	-	-	Nzila et al. 2002
	Chhattisgarh (India)	<i>Gmelina arborea</i>	2,0	-	0,1	-	0,65	-	-	-	-	-	-	-	Swamy et al. 2004
	Pointe-Noire (Congo)	<i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus grandis</i>	1,71-2,05	-	0,15-0,23	-	0,44-0,70	-	0,34-0,41	-	0,31-0,40	-	-	-	Safou-Matondo et al. 2005
	Mayombe (Congo)	<i>Terminalia superba</i>	1,35-1,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Goma-Tchimbakala y Bernhardt-Reversat 2006

Tipo de bosque	Localización	Especies	Nutrientes												Referencia
			N		P		K		Ca		Mg				
			CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN	CHF	RPN			
Bosque húmedo	Queensland (Australia)	Especies dominantes: <i>Acmena vesca</i> , <i>Syzygium wesa</i> , <i>Cardwellia sublimis</i> .	1,0	38	0,03	1	0,43	16	0,97	35	0,28	10	Herbohn y Congdon 1998		
Bosque de tierra firme	Isla Maracá (Brasil)	Especie dominante: <i>Peltogyne gracilipes</i>	1,0	21	0,042	1	0,66	15	0,93	23	0,42	11	Villela y Proctor 1999		
Bosque de tierra firme	Isla Maracá (Brasil)	Especie dominante: <i>Peltogyne gracilipes</i>	-	81	-	8	-	-	-	-	-	-	McDonald y Healey 2000		
Bosque inundable	Pacífico (Colombia)	Especies dominantes: <i>Camprosperma panamensis</i> , <i>Otoba gracilipes</i>	1,33	157	0,04	5	0,05	8	1,05	114	-	19	del Valle 2003		
Bosque seco	Uttar Pradesh (India)	Especies dominantes: <i>Shorea robusta</i> , <i>Madhuca indica</i> , <i>Boswellia serrata</i> , <i>Prosopis juliflora</i>	-	2	-	0,1	-	-	-	2	-	-	Singh et al. 2004		
Bosque lluvioso	Península de Hengchun (Taiwan)	<i>Palaquium formosanum</i> , <i>Bischofia javanica</i> , <i>Aglaia formosanaum</i> , <i>Pouteria obovata</i> , <i>Macaranga tanarius</i> , <i>Pisonia umbellifera</i>	-	76-123	-	1-2	-	26-36	-	196-324	-	22-31	Liao et al. 2006		
Bosque seco	Sierra de Huatla (México)	<i>Lysiloma microphyllum</i>	1,87-1,99	-	-	0,07	-	-	-	-	-	-	Cárdenas y Campo 2007		

Tabla 5. Concentración de nutrientes (%) y retorno potencial vía hojarasca foliar ( $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) en bosques y plantaciones forestales de tierras bajas tropicales.

Tipo de bosque	Localización	Especies	N		P		K		Ca		Mg		Referencia
			IEV	ERN	IEV	ERN	IEV	ERN	IEV	ERN	IEV	ERN	
Plantación	Luquillo (Puerto Rico)	<i>Pinus caribaea</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Swietenia mahagoni</i> .	76-246	16-95	2464-5534	17-113	519-978	10-110	-	-	-	-	Lugo 1992
	Pará (Brasil)	<i>Pinus caribaea</i> , <i>Carapa guianensis</i> , <i>Erythrina parsonsii</i> .	97-239	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Smith <i>et al.</i> 1998
	Toa Baja (Puerto Rico)	<i>Casuarina equisetifolia</i> , <i>Leucaena leucoccephala</i> , <i>Eucalyptus robusta</i>	50-127	30-48	2500-5000	52-66	286-345	52-68	34-68	185-385	-	-	Parrotta 1999
	La Selva (Costa Rica)	<i>Stryphnodendron microstachyum</i> , <i>Vochysia guatemalensis</i> , <i>Jacaranda copaia</i> , <i>Callophyllum brasiliense</i> , <i>Albizia guachapele</i> , <i>Virola koschnyi</i> , <i>Terminalia amazonia</i> , <i>Dipteryx panamensis</i> .	24-101	-	133-833	-	75-286	-	99-270	250-1111	-	-	Montagnini 2000
	Pointe-Noire (Congo)	<i>Eucalyptus sp.</i>	592	-	2000	-	1475	-	1022	1956	-	-	Laclau <i>et al.</i> 2000
	Chhattisgarh (India)	<i>Gmelina arborea</i>	50	-	1000	-	154	-	-	-	-	-	Swamy <i>et al.</i> 2004
	Pointe-Noire (Congo)	<i>Eucalyptus urophylla</i> , <i>Eucalyptus grandis</i>	452-374	-	2130-4090	-	1160-2040	-	1120-1780	2030-2890	-	-	Safou-Matondo <i>et al.</i> 2005
	Mayombe (Congo)	<i>Terminalia superba</i>	72-74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Goma-Tchimbakala y Bernhard-Reversat 2006
Bosque de tierra firme	Pará (Brasil)	Bosque mixto de leguminosas	76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Smith <i>et al.</i> 1998
Bosque húmedo	Queensland (Australia)	Especie dominantes: <i>Acmena vesca</i> , <i>Syzygium wesa</i> , <i>Cardwellia sublimis</i> .	100	-	3333	-	233	-	103	357	-	-	Herbohn y Congdon 1998
Bosque de tierra firme	Isla Maracá (Brasil)	Especie Dominante: <i>Peltogyne gracilipes</i>	-	40-50	-	25-41	-	2-13	-	-	-	-	Villela y Proctor 1999
Bosque seco	Brunei (Borneo)	Bosque dominado por Dipterocarpaceae	104-146	-	3382-3686	-	234-370	-	164-275	288-375	-	-	Moran <i>et al.</i> 2000
Bosque inundable	Pacífico (Colombia)	Especies dominantes: <i>Campnosperma panamense</i> , <i>Otoba gracilipes</i> .	75	-	2500	-	2000	-	95	-	-	-	del Valle 2003
Bosque seco	Sierra de Huatla (México)	<i>Lysiloma microphyllum</i>	-	16-42	-	53-57	-	-	-	-	-	-	Cárdenas y Campo 2007

Tabla 6. Reabsorción de nutrientes y eficiencia en su uso en bosques y plantaciones forestales de tierras bajas tropicales. IEV: Índice de eficiencia de Vitousek, calculado como IEV: 1/concentración del nutriente. ERN: Índice de eficiencia en la reabsorción de nutrientes (%).

#### REABSORCIÓN DE NUTRIENTES FOLIARES Y EFICIENCIA EN SU USO

Los bajos contenidos edáficos de P, y su importancia para la nutrición y desarrollo vegetal, condujeron a su uso eficiente en las plantaciones de *A. mangium*, reflejado a partir de los máximos valores de los índices IEV y ERN (Tabla 4). Las diferencias determinadas entre tratamientos para los índices de este nutriente (Tabla 4), confirmaron la influencia de la calidad de las plantaciones en la EUN, antes que la práctica del subsolado. Además, los valores de EUN registrados para P fueron extremadamente altos cuando se comparan con los reportados para otras plantaciones y para bosques de tierras bajas tropicales (Tabla 6). Esto reitera su carácter restrictivo e importancia para la especie, que acude al desarrollo de mecanismos de conservación (v.gr. reabsorción foliar), para evitar sus pérdidas en el suelo, en donde es extremadamente escaso. La llegada del nutriente al suelo puede conllevar su inmovilización biológica, y/o pérdidas por lixiviación y drenaje profundo. Los valores ERN fueron muy superiores a los reportados por Cavelier (Cavelier, 1996) para bosques tropicales de tierras bajas (29,0-50,0%). Igualmente, fueron notoriamente altos cuando se comparan con los valores de reabsorción de P encontrados para especies de bosques tropicales de tierras bajas de Camerún (Chuyong *et al.*, 2000), cuyos promedios para especies ectomicorrícicas eran de 16,0% y para especies no ectomicorrícicas de 50,0%. Por otra parte, la alta eficiencia en el uso de P en estas plantaciones de *A. mangium* coincide con planteamientos que señalan (Silver, 1994; Newbery *et al.*, 1997) que bajo condiciones de extrema escasez de P edáfico, suele verificarse una alta eficiencia en su empleo por las plantas, confirmando la hipótesis de limitaciones por P.

Los valores de eficiencia en el uso de N, se corresponden con los de bosques y plantaciones tropicales de tierras bajas (Tabla 6). No obstante, los valores ERN se encuentran cerca de su límite inferior. Aunque se encontraron valores altos de ERN para N en todos los tratamientos (Tabla 4), estos pueden ser resultado del pluviolavado del nutriente en el dosel, proceso no considerado en este experimento, y que puede conducir a sobrestimaciones de las cantidades realmente reabsorbidas. El valor medio del IEV para N (81,5) fue inferior al reportado para plantaciones de *Eucalyptus* sp. de África (592) (Laclau *et al.*, 2000), y cercano a los valores indicados por Smith *et al.*, 1998, para el Amazonas brasileiro (IEV: 84,8 para bosques naturales y IEV: 96,5 para plantaciones de *Carapa guianensis*). Estos últimos autores reportaron menores valores en la eficiencia en el uso de N para plantaciones forestales de leguminosas, situación acorde con nuestros resultados, y atribuible a las asociaciones con bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico. Por otra parte, aunque para ninguno de los dos índices calculados (IEV y ERN) para N se determinaron diferencias no significativas entre tratamientos (Tabla 4), los mayores valores fueron siempre registrados para SA y SB, lo cual sugiere un mayor efecto de la práctica de subsolado. A diferencia de lo recién indicado, para Ca y Mg los mayores valores del IEV se determinaron en los tratamientos SB y NA, mostrando un menor efecto del subsolado y de la calidad de las plantaciones. Los valores medios del ERN para Ca mostraron que a pesar de su baja movilidad, este nutriente es reabsorbido, en mayores proporciones incluso (20,3%), que Mg (14,1%). Nuestros valores IEV para Ca y Mg se localizaron muy por debajo de los reportados para plantaciones de tierras bajas tropicales (Tabla 6), señalando la baja restricción de ambos nutrientes para estas plantaciones de *A. mangium*. Aunque los valores ERN de K fueron altos (68,6%), los valores del IEV fueron en términos generales inferiores

a los de otros estudios (Tabla 6). Aun cuando se ha argumentado que nutrientes móviles como K, requeridos para diferentes procesos fisiológicos, son con frecuencia reabsorbidos, su fácil lavado foliar puede disminuir las concentraciones en las hojas verdes, y con ello sobreestimar los cálculos de la reabsorción (Ramírez *et al.*, 2007).

## CONCLUSIONES

La producción anual de hojarasca fina de las plantaciones de *A. mangium* del Bajo Cauca Antioqueño fue alta, y representó una fuente importante de materia orgánica y de nutrientes para estos suelos degradados por procesos ancestrales de minería. Las concentraciones foliares de N y su retorno potencial a través de la hojarasca foliar fueron asimismo altos, como resultado de la capacidad de la especie para asociarse con bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico. Los resultados mostraron claramente al P como el nutriente limitante de la productividad de las plantaciones de esta especie, lo cual se sustenta en su baja disponibilidad en el suelo, sus bajas concentraciones foliares, el elevado valor del parámetro N/P en la hojarasca foliar, los bajos valores del parámetro P/N en las hojas maduras, la tasa elevada de reabsorción, y asociada a esta última, la alta eficiencia en su uso establecida a partir del índice IEV.

Los mayores retornos de materia orgánica y nutrientes, se presentaron en los tratamientos de calidad alta, mientras que la mayor eficiencia en el uso de la mayoría de nutrientes se encontró en los sitios de menor calidad. Por otra parte, la práctica de subsolado del suelo no tuvo efectos significativos sobre los procesos del ciclo biogeoquímico aquí estudiados. Si bien para que la incorporación de materia orgánica y nutrientes se produzcan de manera efectiva en el suelo, deben desarrollarse previamente sobre la hojarasca los procesos de descomposición y mineralización, se puede afirmar que los retornos potenciales aquí determinados, contribuyen de manera significativa en la reconstitución de los ciclos biogeoquímicos y en particular, en la procura de objetivos de restauración ecológica y/o rehabilitación físicoquímica de los suelos. Los resultados de este estudio conducen a rechazar parcialmente la hipótesis de partida, ya que el tratamiento de subsolado no tuvo efecto sobre los procesos de producción de hojarasca fina, retorno de nutrientes y eficiencia en su uso. Por otra parte, aunque en términos generales la calidad de las plantaciones reveló los mayores valores de producción de hojarasca fina y retorno de nutrientes, no reflejó una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes.

## AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) por la financiación del proyecto “Evaluación silvicultural de las plantaciones de *Acacia mangium* Willd. y su papel en la recuperación de suelos en el Bajo Cauca Antioqueño” (Contrato 7214 del 2006). Al ingeniero forestal Nolberto Marín, funcionario de CORANTIOQUIA, por el seguimiento y acompañamiento técnico durante la ejecución del proyecto. A Luis Fernando Osorio, docente de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, como director del proyecto. Al ingeniero forestal Juan Carlos Guinge por su apoyo incondicional en las labores de campo, laboratorio y procesamiento de la información. A Miguel Guzmán por el acompañamiento en las labores de campo. Al Área de Biogeoquímica del

---

Laboratorio de Ecología Cesar Pérez Figueroa de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, y en particular a su laboratorista Gloria Mazo. A Diego Navarrete de la Fundación Puerto Rastrojo, y a los profesores Walter Osorio y Alvaro Lema por los valiosos aportes para la elaboración de este documento.

## BIBLIOGRAFÍA

AERTS R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*. 1997;79:439-449.

AGUDELO SL, ARISTIZÁBAL CL. Estimación de la caída de hojarasca y detritos leñosos en bosques primarios intervenidos y secundarios de la región de Porce, Colombia [tesis de pregrado]. Medellín: Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; 2003.

CÁRDENAS I, CAMPO J. Foliar nitrogen and phosphorus resorption and decomposition in the nitrogen-fixing tree *Lysiloma microphyllum* in primary and secondary seasonally tropical dry forests in Mexico. *J Trop Ecol*. 2007;23:107-113.

CAVELIER J. Environmental factors and ecophysiological processes along altitudinal gradients in wet tropical mountains. En: Mulkey SS, Chazdon RL, Smith AP, editors. *Tropical forest plant ecophysiology*. New Cork: Chapman & Hall; 1996. p. 399-439.

CHUYONG GB, NEWBERY DM, SONGWE NC. Litter nutrients and retranslocation in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *Res New Phytol*. 2000;148:493-510.

BARLOW J, GARDNER TA, FERREIRA LV, PERES CA. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. *Forest Ecol Manag*. 2007;247:91-97.

BERNHARD-REVERSAT F. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferrallitic soils (Congo). *Acta Oecol*. 1993;14(2):179-195.

BROWN S, LUGO AE. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*. 1982;14:161-187.

CÁRDENAS I, CAMPO J. Foliar nitrogen and phosphorus resorption and decomposition in the nitrogen-fixing tree *Lysiloma microphyllum* in primary and secondary seasonally tropical dry forests in Mexico. *J Trop Ecol*. 2007;23:107-113.

CUEVAS E, LUGO A. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. *Forest Ecol Manag*. 1998;112:263-279.

DEL VALLE JI. Cantidad, calidad y nutrientes reciclados por la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico Sur Colombiano. *Interciencia*. 2003;28:443-449.

DUPONNOIS A, BA. Growth stimulation of *Acacia mangium* Willd by *Pisolithus* sp. in some Senegalese soils. *Forest Ecol Manag*. 1999;119:209-215.

FINZI AC, ALLEN AS, DE LUCIA EH, ELLSWOTTH DS, SCHLESINGER WH. Forest litter production, chemistry and decomposition following two years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Ecology*. 2001;82:470-484.

GOMA-TCHIMBAKALA J, BERNHARD-REVERSAT F. Comparison of litter dynamics in three plantations of an indigenous timber-tree species (*Terminalia superba*) and a natural tropical forest in Mayombe, Congo. *Forest Ecol Manag*. 2006;229:304-313.

HAGEN-THORN A, VARNAGIRYTE I, NIHLGARD B, ARMOLAITIS K. Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. *Forest Ecol Manag.* 2006;228:33-39.

HERBOHN JL, CONGDON RA. Ecosystem dynamics at disturbed and undisturbed sites in north Queensland wet tropical rain forest. III. Nutrient returns to the forest floor through litterfall. *J Trop Ecol.* 1998;14(2):217-229.

HIROSE T. Relations between turnover rate, resource utility and structure of some plant populations: a study of the matter budgets. *J Fac Sci Tokio Univ Sect III.* 1975;11:355-407.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). Levantamiento semidetallado de las coberturas terrestres. Departamento de Antioquia. Subdirección Agronomía, Bogotá. Bogotá: IGAC; 2007.

KUMAR R, AGRAWAL M. Litterfall, litter decomposition and nutrient release in five exotic plant species planted on coal mine spoils. *Pedobiologia.* 2001;45:298-312.

LACLAU JP, BOUILLET JP, RANGER J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecol Manag.* 2000;128:181-196.

LANDSBERG JJ, GOWER ST. Applications of physiological ecology to forest management. New York: Academic Press; 1997.

LEÓN JD, DÍEZ MC, CASTELLANOS J, OSORIO LF, MARÍN N. Grupos funcionales de microorganismos en suelos degradados por minería de aluvión plantados con *Acacia mangium*. *Suelos Ecuatoriales.* 2008;38(1):75-80.

LIAO JH, WANG HH, TSAI CHCH, HSEU ZY. Litter production, decomposition and nutrient return of uplifted Coral Reef tropical forest. *Forest Ecol Manag.* 2006;235:4-185.

LIM MT. Studies on *Acacia mangium* in Kemasul forest, Malaysia. I. Biomass and productivity. *J Trop Ecol.* 1988;4(3):293-302.

LUGO AE. Comparison of tropical tree plantations with secondary forests of similar age. *Ecological Monographs* 1992;62:1-41.

MALL LP, SINGH VP, GRACE A. Study of biomass, litter fall, litter decomposition and soil respiration in monogeneric mangrove and mixed mangrove forest of Andaman Island. *Trop Ecol.* 1991;32:144-152.

MCDONALD MA, HEALEY JR. Nutrient cycling in secondary forests in the Blue Mountains of Jamaica. *Forest Ecol Manag.* 2000;139:257-278.

MONTAGNINI F. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral nutrients in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland. *Forest Ecol Manag.* 2000;134:257-270.

MORAN JA, BARKER MG, MORAN AJ, BECKER P, ROSS SM. A comparison of the soil water, nutrient status, and litterfall characteristics of tropical heath and mixed-dipterocarp forest sites in Brunei. *Biotropica.* 2000;32(1):2-13.

NEWBERY DM, ALEXANDER IJ, ROTHER JA. Phosphorus dynamics in a lowland African rain forest: the influence of ectomycorrhizal trees. *Ecol Monogr.* 1997;67:367-409.

NGORAN A, ZAKRA N, BALLO K, KOUAMÉ C, ZAPATA F, *et al.* Litter decomposition of *Acacia auriculiformis* Cunn. Ex Benth. and *Acacia mangium* Willd. under coconut trees on quaternary sandy soils in Ivory Coast. *Biol Fertil Soils.* 2006;43:102-106.

NORGROVE L, HAUSER S. Production and nutrient content of earthworm casts in a tropical agrisilvicultural system. *Soil Biol Biochem.* 2000;32:1651-1660.

NZILA JD, BOUILLET JP, LACLAUD JP, RANGER J. The effect of slash management on nutrient cycling and tree growth in *Eucalyptus* plantations in the Congo. *Forest Ecol Manag.* 2002;171:209-221.

PARROTTA J. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *Forest Ecol Manag.* 1999;124:45-77.

PROCTOR J. Tropical forest litterfall. I. Problems of data comparison. En: Sutton SL, Whitmore TC, Chadwick AC, editors. *Tropical rain forest.* Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1983. p. 267-273.

PROCTOR J, PHILLIPS C, DUFF GK, HEANEY A, ROBERTSON FM. Ecological studies on Gunung Silam, a small ultrabasic mountain in Sabah, Malaysia. Some forest processes. *J Ecol.* 1989;77:317-331.

RAMÍREZ JA, ZAPATA CM, LEÓN JD, GONZÁLEZ MI. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia.* 2007;32(5):303-311.

SAFOU-MATONDO R, DELEPORTE P, LACLAU JP, BOUILLET JP. Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. *Forest Ecol Manag.* 2005;210:193-204.

SAHARJO BH, WATANABE H. Estimation of litter fall and seed production of *Acacia mangium* in a forest plantation in south Sumatra, Indonesia. *Forest Ecol Manag.* 2000;130:265-268.

SENEVIRATNE G, VAN HOLM LHJ, KULASOORIYA SA. Quality of different mulch materials and their decomposition and N release under low moisture regimes. *Biol and Fertil Soils.* 1998;26:136-140.

SILVER WL. Is nutrient availability related to plant nutrient use in humid tropical dry forest?. *Oecologia.* 1994;98:336-346.

SINGH KP, SINGH PK, TRIPATHI SK. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biol and Fertil Soils.* 1999;29:371-378.

SINGH R, KUMAR R, AGRAWAL M. Litter decomposition and nutrient release in relation to atmospheric deposition of S and N in a dry tropical region. *Pedobiologia.* 2004;48:305-311.

SMITH CK, GHOLZ HL, OLIVEIRA F. Litterfall and nitrogen-use efficiency of plantations and primary forest in the eastern Brazilian Amazon. *Forest Ecol Manag.* 1998;109:209-220.

SPAIN AV. Litterfall and the standing crop of litter in three tropical Australian rainforests. *J Ecol.* 1984;72:947-961.

STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION: Statgraphics Centurion [Programa de ordenador] Versión XV. Warrenton: Statistical Graphics Corporation. Disponible en: [www.statgraphics.com](http://www.statgraphics.com); 2002.

SWAMY S, PROCTOR J. Fine litterfall and its nutrients in plantation of *Acacia auriculiformis*, *Eucalyptus tereticornis* and *Tectona grandis* in the Chikmagalur district of the western Ghats, India. *J Trop Forest Sci.* 1997;10(1):73-85.

SWAMY SL, KUSHWAHA SK, PURI S. Tree growth, biomass, allometry and nutrient distribution in *Gmelina arborea* stands grown in red lateritic soils of central India. *Biomass Bioenerg.* 2004;26:305-317.

TORRES DA, DEL VALLE JI. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forest.* 2007;34:293-305.

TSUKAMOTO J, SABANG J. Soil macro-fauna in an *Acacia mangium* plantation in comparison to that in a primary mixed dipterocarp forest in the lowlands of Sarawak, Malaysia. *Pedobiologia.* 2005;49:69-80.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-CORANTIOQUIA. Evaluación silvicultural de las plantaciones de *Acacia mangium* Willd. y su papel en la recuperación de suelos en el Bajo Cauca Antioqueño. Informe final Contrato 7214 del 2006; Medellín: Universidad Nacional de Colombia-Corantioquia; 2008.

VENEKLAAS EJ. Litterfall and nutrient fluxes in two montane tropical rain forests, Colombia. *J Trop Ecol.* 1991;7:319-336.

VILLELA DM, PROCTOR J. Litterfall mass, chemistry and nutrient retranslocation in a monodominant forest on Maraca island, Roraima, Brazil. *Biotropica.* 1999;31(2):198-211.

VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *Am Nat.* 1982;119:553-572

VITOUSEK P. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology.* 1984;65(1):285-298.

VITOUSEK PM, SANFORD RL. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 1986;17:137-167.

WEAVER PL, MEDINA E, POOL D, DUGGER K, GONZÁLEZ-LIBOY J, *et al.* Ecological observations in the dwarf cloud forest of the Luquillo mountains in Puerto Rico. *Biotropica.* 1986;18:79-85.

ZAPATA CM, RAMÍREZ JA, LEÓN JD, GONZÁLEZ MI. Producción de hojarasca fina en bosques altoandinos de Antioquia, Colombia. *Rev Fac Nac Agron.* 2007;60(1):3771-3784.