

Segundo seminario regional

# Materia orgánica, biología del suelo y productividad agrícola

Comité Regional Eje Cafetero

SOCIEDAD COLOMBIANA  
DE LA CIENCIA DEL SUELO  
COMITÉ REGIONAL EJE CAFETERO



Publicación de la Sociedad Colombiana  
de la Ciencia del Suelo

Apoyan



---

Armenia, 19 de noviembre de 2009

631.46 S23

SEGUNDO seminario regional materia orgánica, biología del suelo y productividad agrícola : Comité regional eje cafetero. Armenia: Sociedad colombiana de la ciencia del suelo: CENICAFE: Federación Nacional de Cafeteros, 2009. 136 p.

/Suelos/ /Compost/ /Humus/ /Microorganismos/ /Materia orgánica/ /Biomasa/ /Agroecosistemas/

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo  
Carrera 11 N° 66 - 34 - Oficina 202 Bogota - Colombia  
Teléfonos: 2113383 - 2113185  
E-mail: [oficinappal@scsuelo.org](mailto:oficinappal@scsuelo.org); [scsuelo@cable.net.co](mailto:scsuelo@cable.net.co)  
Comité Regional Eje Cafetero: [scsejecafetero@gmail.com](mailto:scsejecafetero@gmail.com)

**Comité Organizador:**

Jorge Enrique Cuervo Alzate  
Carmen Soledad Morales Londoño  
Héctor Fernando Franco Álvarez  
Fredy Eliseo Hernández Jorge  
Mónica Alexandra Dávila Londoño  
Hernán González Osorio

**Edición**

Sandra Milena Marín López  
Jaime Arcila Pulgarín

**Diseño, diagramación**

María del Rosario Rodríguez Lara

**Fotografía Carátula**

Gonzalo Hoyos S.

Impresora Feriva  
Primera edición  
400 ejemplares

© Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 2009  
Chinchiná, Colombia

Las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo.

# Prólogo

Dentro de las tendencias de la agricultura moderna, se contempla la necesidad de producir biocombustibles y el uso de prácticas e insumos que garanticen la sostenibilidad de los predios agrícolas. Sumado a esto, vienen surgiendo nichos de mercado interesados en comercializar alimentos y materias primas con el sello de “agricultura biológica”, “agricultura limpia” y “agricultura orgánica”. Bajo este esquema, se ha iniciado una búsqueda de alternativas para sustituir total o parcialmente los fertilizantes químicos de síntesis y otros insumos, mediante el uso de microorganismos, abonos orgánicos, humus, por mencionar algunos recursos.

En un amplio sentido, el término materia orgánica se ha utilizado para designar a los organismos vivos, sustancias sólidas y líquidas en diferente estado de alteración e incluso para referirse al humus del suelo. Esta consideración, ha servido de base para que se emitan una serie de recomendaciones generales y de paso se ofrezcan diversos productos tendientes a mejorar el desempeño agronómico de algunas fuentes fertilizantes y promover algunos atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, entre otros aspectos. Por esta razón en el presente libro, se tratará de precisar a la luz de los conceptos de la ciencia del suelo y de algunas experiencias obtenidas en importantes campos agrícolas del país, cuáles son las características en las que el recurso orgánico y vivo del suelo puede llegar a participar, con el fin de contribuir con su conservación y a un aprovechamiento racional del mismo.

**Hernán González Osorio**

Cenicafé



# Presentación

El libro “Materia orgánica, biología del suelo y productividad agrícola” recopila conceptos fundamentales de expertos en el campo de la ciencia del suelo, resumiendo algunas observaciones y experiencias obtenidas en diferentes zonas y cultivos del país, en procura de buscar alternativas que conduzcan a la conservación del suelo y en especial de la materia orgánica.

En sus capítulos se encuentran diferentes aspectos relacionados con el humus de la zona cafetera colombiana, su contenido y relación con algunas propiedades químicas y físicas del suelo, los microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes y todo lo relacionado con el compostaje y los índices para evaluar su estabilidad. También se presentan temas relacionados con la materia orgánica en agroecosistemas cafeteros y la producción y descomposición de biomasa seca y transferencia de nutrientes en sistemas agroforestales con café.

Para el Comité Regional Eje Cafetero de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, es muy satisfactorio presentar su primer libro, como un aporte al agro colombiano para dar claridad, entre otros aspectos, a términos muy usados entre los cultivadores como son “materia orgánica”, “humus”, “compost”, “abonos orgánicos” y “enmiendas orgánicas”.

**Jorge Enrique Cuervo Alzate**  
Director Regional Eje Cafetero

# Agradecimientos

Se agradece muy especialmente a las personas y entidades que hicieron posible esta publicación:

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Al Doctor Gabriel Cadena Gómez, Ex Director del Centro Nacional de Investigaciones de Café- Cenicafé, y actual Rector de la Universidad Autónoma de Manizales.

Al Doctor Jaime Arcila Pulgarín, Director (E) del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé.

A la Sección de Divulgación y Transferencia del Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé.

# Contenido

Hojas de vida Palelistas	9
<b>El humus en la zona cafetera Colombiana</b> Contenido, calidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas del suelo Hernán González Osorio	11
<b>El compostaje y los índices para evaluar su estabilidad</b> Raúl Darío Zapata Hernández	33
<b>Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas</b> Nelson Walter Osorio	43
<b>La materia orgánica en agroecosistemas cafeteros de Colombia</b> Siavosh Sadeghian Khalajabadi	72
<b>Producción y descomposición de biomasa seca y transferencia de nutrientes en sistemas agroforestales con café</b> Fernando Farfán Valencia	100





# Hojas de vida Panelistas

**Hernán González Osorio.** Investigador Disciplina Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé. Ingeniero Agrónomo, M.Sc. en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Hernan. Gonzalez@cafedecolombia.com

**Raúl Darío Zapata Hernández Vega.** Docente, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Ph.D. en Suelos, Universidad Central de Venezuela. rdzapata@unalmed.edu.co

**Nelson Walter Osorio.** Docente, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Ph.D. en Ciencia del Suelo Universidad de Hawaii. nwsorio@unal.edu.co

**Siavosh Sadeghian Khalajabadi.** Investigador Disciplina Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé. Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Candidato a Ph.D. en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Siavosh.Sadeghian@cafedecolombia.com

**Fernando Farfán Valencia.** Investigador Disciplina Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé. Ingeniero Agrónomo Universidad de Caldas. Fernando.Farfán@cafedecolombia.com





# El humus en la zona cafetera colombiana

## Contenido, calidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas del suelo

Hernán González Osorio  
Investigador Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé

### INTRODUCCIÓN

El término materia orgánica se ha usado para referirse a todas aquellas sustancias del suelo que poseen carbono (38), abarca una mezcla de compuestos que van desde tejidos animales y/o vegetales en diferentes estados de alteración (6), hasta materiales estables, de color oscuro, que no presentan semejanza alguna con la estructura de la cual proceden (43). En ella, se incluye también gran diversidad de organismos vivos entre los que se cuentan hongos, bacterias, lombrices, nematodos, artrópodos y raíces de plantas.

Desde el punto de vista agronómico, la materia orgánica del suelo (MO) como tal, comprende un recurso natural que se forma a partir de la biomasa que ingresa al suelo por medio de materias primas tales como hojas, tallos y raíces de plantas, residuos de cosechas, abonos orgánicos, así como tejidos y estiércoles de animales y otros organismos, los cuales a través del tiempo y en unas condiciones de relieve, clima y suelos específicas, cambian su apariencia física, química y morfológica, dando como resultado un material que regula las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos cultivados.

El contenido total de MO que posea el suelo en un momento determinado, depende de la cantidad y la calidad de los materiales orgánicos que reciba, del manejo que se le de a los mismos, del relieve (gradiente y longitud de la vertiente), la temperatura y la naturaleza físico - química del suelo (18). Lo que en síntesis encierra los cinco factores formadores del suelo.

Estudios adelantados en Cenicafé (9), demostraron que los aportes de biomasa en los ecosistemas de café a libre exposición solar y café con sombrío de guamo (*Inga* spp.), es mayor, casi tres veces, al de café a libre exposición solar y que la velocidad de descomposición de las hojas del cafeto es mayor a las del guamo; aspecto que puede explicar la acumulación de mantillo bajo condiciones de sombrío.

Cómo citar:

González-Osorio, H. (2009). El humus en la zona cafetera colombiana: Contenido calidad y su relación con algunas propiedades físicas y químicas del suelo. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 11–32). Cenicafé.  
[https://doi.org/10.38141/10791/0003\\_1](https://doi.org/10.38141/10791/0003_1)

Respecto al material parental de los suelos, es importante recalcar que los derivados de cenizas volcánicas, por ejemplo, presentan algunos atributos que les permiten acumular altas cantidades de MO, dado que es factible que se formen complejos organo-minerales mediante los cuales se establece una barrera para la degradación microbiana (46). Si bien, esta condición es relevante, *per se*, no siempre es garantía para un alto nivel de MO. Agentes como la temperatura del suelo, la cual generalmente es mayor a la temperatura ambiental (21), juegan un papel determinante, puesto que a medida que los valores se incrementan puede haber una mayor actividad de microorganismos (43, 26), y con ella, los valores de MO tienden a ser menores.

En la Tabla 1, puede apreciarse un ejemplo de las variaciones en los contenidos de MO en función del material parental y la temperatura ambiental y edáfica, para algunos suelos de la zona cafetera colombiana (16).

En un amplio sentido, el término MO es utilizado indistintamente para referirse al humus del suelo. Dicha consideración ha servido de base para que se emitan una serie de recomendaciones generales, tendientes a mejorar el desempeño agronómico de algunas fuentes fertilizantes y promover algunos atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, entre otros aspectos. Por tal razón, en los siguientes ítems se tratará de precisar a la luz de los conceptos de la ciencia del suelo y de algunas experiencias en la zona cafetera colombiana, cuáles son las características en las que el recurso orgánico del suelo puede llegar a participar, con el fin de contribuir en la búsqueda de alternativas que conduzcan a su conservación y un mejor aprovechamiento del mismo.

**Tabla 1.** Temperatura ambiental, temperatura del suelo y contenidos de MO en los primeros 30 cm del horizonte A, de cafetales a libre exposición solar y con sombrero de guamo, ubicados en seis unidades de suelos representativas de la zona cafetera colombiana.

Unidad de suelo	Material parental	Temperatura (°C)		MO (%)	
		Suelo	Aire	Café sombrero	Café al sol
Chinchiná	Cenizas volcánicas	21,29	19,97	14,7 a	14,5 a
Guamal	Arenisca olivínica	23,66	21,40	11,1 a	7,1 b
Doscientos	Basalto augítico	20,50	20,48	12,1 a	12,1 a
Complejo Tablazo	Filita micácea	20,00	18,70	11,9 a	10,9 a
Amiba	Serpentinita	21,00	19,40	7,9 a	6,7 a
Cascarero	Esquisto actinolítico	24,00	20,00	7,1 a	6,8 a

Letras distintas indican diferencia estadística entre agroecosistemas, según prueba *t* al 5%.

\* Promedio de 80 muestras de suelo.

## FRACCIONES DE LA MO

Una vez los tejidos orgánicos entran al suelo, inicia una transformación eminentemente biológica, a partir de la cual se presenta una liberación de calor, agua y CO<sub>2</sub>, principalmente. Luego de este primer proceso, los compuestos orgánicos resultantes pueden tomar dos rutas, que entren a formar parte de la MO ligera, o que pasen a constituir la MO estable.

**MO ligera.** Es una fracción que comprende una alta proporción de tejidos con una estructura tal, que los microorganismos pueden aprovecharla como fuente de energía. En la medida en que el componente vivo del suelo la utiliza para este fin, los nutrientes contenidos en ella (nitrógeno, fósforo, azufre y algunos elementos menores) se convierten en el corto y mediano plazo, en formas minerales aprovechables por las raíces de las plantas (25), por medio del proceso de mineralización.

Lo característico de esta fracción es que puede ser identificable por la química orgánica, es decir, comprende proteínas, aminoácidos, carbohidratos y resinas, entre otros (44).

**MO estable.** Contrario a lo anterior, aquellas estructuras cuya complejidad constituye una barrera para la degradación microbiana quedan como reserva, y con el tiempo, bajo unas condiciones específicas de suelo, cultivo, clima y relieve, pasan a conformar la fracción denominada materia orgánica estable o humus<sup>1</sup> propiamente dicho (38).

Los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos<sup>2</sup> y las huminas hacen parte de este tipo de MO y su composición química elemental comprende carbono, oxígeno, hidrógeno, azufre, fósforo y nitrógeno. El proceso que conduce a la formación del humus es denominado humificación. La humificación de las sustancias que llegan al suelo está sometida, al igual que el constituyente inorgánico del mismo, a la acción de los factores formadores del suelo. Según Kononova (22) los factores de formación que tienen mayor impacto en la producción y madurez del humus son en su respectivo orden: clima > organismos > topografía del terreno = material parental > tiempo. Andreux (1) y González *et al.* (15) destacan al clima y al uso del suelo como dos de los factores más determinantes.

A diferencia de la MO ligera, la definición de humus no implica un grupo particular de productos orgánicos de relativo peso molecular y reactividad química, ésta es en esencia el resultado de la combinación de compuestos orgánicos recalcitrantes que se unen al azar (40), razón por la cual el número de unidades estructurales que pueden existir en el suelo es muy grande y la probabilidad de combinación puede llegar a ser incalculable.

### Consideración práctica

Tanto la mineralización como la humificación ocurren simultáneamente, y a pesar de que son fenómenos distintos, no está por demás recalcar que en el primero de ellos es necesario que los microorganismos del suelo actúen como intermediarios. La humificación en cambio, obedece a reacciones físico-químicas, en las cuales no participa el componente vivo del suelo (44). Bajo estas consideraciones, es preciso tener en cuenta dos aspectos:

---

<sup>1</sup>Latín que indica suelo

<sup>2</sup>Latín para *fulvus* que indica amarillo

1). No es correcto denominar humus a materiales tales como excretas de lombriz; 2). En condiciones de uso y manejo racional del suelo, los microorganismos y las plantas pueden potencialmente aprovechar los nutrientes que componen el humus, pero esto ocurre a muy largo plazo.

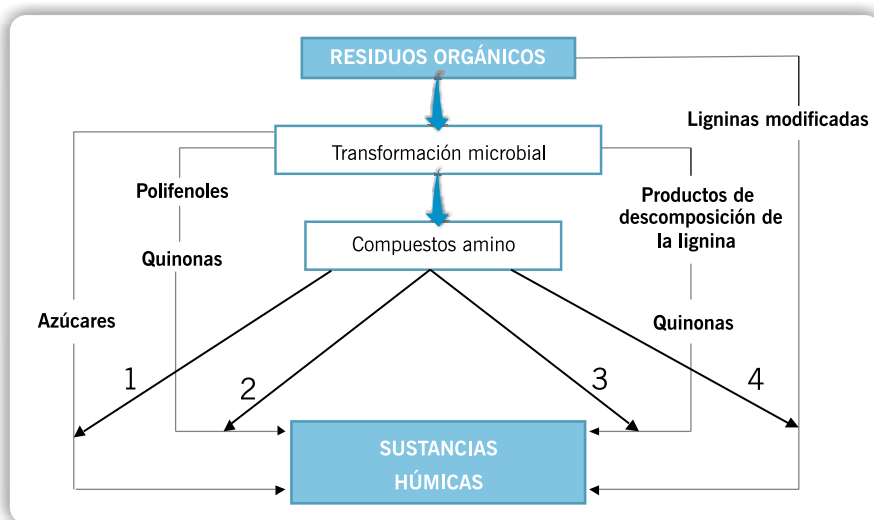
## FORMACIÓN DEL HUMUS

La bioquímica de las sustancias húmicas es uno de los aspectos menos entendidos de la química del humus (5). En el ámbito científico, algunos estudiosos del tema han postulado las siguientes teorías (20, 40), presentadas de manera resumida, que describen cuatro rutas que deben atravesar los restos vegetales y animales en su camino hacia la humificación (Figura 1).

### Formación del humus a partir de la lignina (Primera ruta)

Las ligninas constituyen uno de los biopolímeros más abundantes de la corteza terrestre, con una estructura lo suficientemente recalcitrante para dejarse sintetizar fácilmente por el componente vivo del suelo (17). Sólo algunos microorganismos muy especializados pueden ejercer dicha acción (13). Bajo los anteriores preceptos, una descomposición incompleta de la lignina conduce a la formación de precursores del humus.

En principio, el producto inicial serían las huminas, las cuales por fragmentación y oxidación darían lugar a los ácidos húmicos que a su vez, por mecanismos adicionales de oxidación y fragmentación, forman los ácidos fúlvicos.



**Figura 1.** Representación esquemática de las rutas que explican la formación de humus en el suelo (tomado de Stevenson y Cole, 1999).

La modificación de ligninas involucra la pérdida de grupos metoxílicos ( $\text{OCH}_3$ ), generación de O-hidroxifenoles y oxidación de cadenas alifáticas laterales para la formación de grupos  $\text{COOH}$ . El material modificado es sometido posteriormente a procesos desconocidos para permitir la formación de ácidos húmicos y posteriormente ácidos fúlvicos (20).

En síntesis, según esta ruta, la formación del humus tiene como punto de partida polímeros muy complejos, de elevada condensación.

### **Hipótesis del polifenol (Segunda y tercera rutas de formación del humus)**

A diferencia de la hipótesis de la lignina, esta teoría considera como materiales de partida algunos compuestos orgánicos de bajo peso molecular (distintos a la lignina), como es el caso de la celulosa. En este caso, los ácidos liberados durante el ataque microbial (este último de carácter enzimático) llevan a la conversión de quinonas, las cuales se polimerizan en presencia de compuestos amino, para finalmente obtener macromoléculas similares al humus.

La segunda y tercera rutas son similares, salvo que en la segunda, los polifenoles son sintetizados por microorganismos que utilizan el carbono procedente de fuentes distintas a la lignina.

### **Condensación de amino azúcares (Cuarta ruta de formación del humus)**

La idea según la cual el humus está formado por azúcar es bastante antigua, y se fundamenta en el hecho que los microorganismos del suelo producen azúcares y aminoácidos a partir de la degradación enzimática de compuestos como celulosa y proteínas. La reducción de azúcares y aminoácidos formados a partir del metabolismo microbial, experimenta una polimerización no enzimática, que permite la formación de polímeros nitrogenados pardos, similares a los que se producen durante la deshidratación de ciertos alimentos bajo condiciones de temperatura moderada.

Aunque las reacciones mencionadas pueden avanzar de manera lenta, en condiciones normales de temperatura, los frecuentes eventos de humedecimiento y secado facilitan la unión de los azúcares con la parte mineral del suelo (que actúa como agente catalizador) y su posterior condensación.

Si bien, algunos reportes de la literatura pueden señalar que alguna de las anteriores rutas tiene mayor participación que otra en la formación del humus, es importante resaltar que las cuatro pueden estar ocurriendo al tiempo, todo depende del ambiente de formación y del tipo de sustrato orgánico que se tenga como material de partida.

## **EXTRACCIÓN Y FRACCIONAMIENTO DEL HUMUS**

En razón a la complejidad que caracteriza estas sustancias, su fraccionamiento es meramente operacional y se define con base en la solubilidad que tengan en diferentes soluciones (31).

Los procedimientos clásicos para extraer el humus del suelo, se basan en el principio de que este recurso es un coloide cargado negativamente, propiedad que favorece su atracción por los puntos positivos de las arcillas y la precipitación con cationes tipo aluminio, hierro y calcio (5). Bajo este esquema, incrementar el pH del medio induce a una competencia de los iones  $\text{OH}^-$  por los sitios cargados positivamente de las partículas inorgánicas del suelo.

Aunque los diferentes métodos propuestos para extraer humus, en esencia no son muy disímiles entre sí, presentan algunas variaciones, particularmente en aspectos relacionados con la preparación de las muestras y la purificación del producto final (40).

Señalar algún método de extracción como ideal, resulta una labor sumamente difícil, dado que para determinados tipos de suelos las sustancias húmicas no alcanzan a extraerse completamente, y las que se obtienen, regularmente vienen contaminadas con productos inorgánicos, tales como arcillas y cationes (12).

A nivel general, se efectúa la extracción con NaOH en diferentes concentraciones (comúnmente entre 0,1 – 0,5 M), como se ilustra en la Figura 2. Posteriormente, por medio de un tratamiento ácido (generalmente con HCl), se obtienen dos fracciones, una fracción fúlvica en la solución y la fracción húmica en el precipitado (Figura 3). Cada una de éstas es sometida a diferentes procesos de purificación para obtener finalmente ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (20).

### Ácidos húmicos (AH)

Los AH se presentan como sólidos amorfos de color marrón oscuro, generalmente insolubles en agua, pero fácilmente dispersables en las soluciones acuosas de los hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos. Éstos presentan una elevada capacidad



**Figura 2.** Solución resultante de la extracción con álcalis.



**Figura 3.** La reacción ácida permite separar la fracción húmica (precipitado) de la fracción fúlvica (sobrenadante amarillo).



de intercambio catiónico (CIC), reflejada en la gran cantidad de grupos ácidos y fenólicos que poseen (45).

Desde el punto de vista estructural (Figura 4), su molécula está constituida por un núcleo de naturaleza aromática y de una región periférica, con predominio de radicales alifáticos, que en su conjunto tienen la apariencia de heteropolímeros condensados.

Aunque en la literatura se especula acerca de la posible constitución estructural de este tipo de compuestos desde hace más de cien años, hasta la última década del siglo XX ninguno de los reportes se había considerado satisfactorio (40).

### Ácidos fúlvicos (AF)

Constituyen una serie de compuestos sólidos o semisólidos, no cristalinos (22), de color amarillo o pardo - amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y solubles a cualquier nivel de pH (20).

Estructuralmente, los AF se caracterizan por su bajo contenido de carbono (menor al de los AH) y un significativo número de grupos funcionales, particularmente carboxílicos (COOH), que le imprimen una mayor acidez, con una notable capacidad de complejación en comparación a la registrada para los AH. Dicha propiedad ha sido corroborada en diferentes estudios realizados bajo condiciones de Chile y Colombia (Tabla 2).

Los AF al tener una alta cantidad de grupos ácidos con una mayor capacidad de complejación, y al ser solubles bajo cualquier condición de pH, actúan de manera significativa en la movilidad de cationes en el suelo (45).

La molécula central de estas sustancias probablemente consiste en micelas de naturaleza polimérica, cuya base estructural está compuesta por un anillo di o trihidroxifenol, unido por  $-CH_2-$ ,  $-NH-$ ,  $-N=$ ,  $-S-$  y grupos OH libres, que establecen doble enlace con las quinonas (40).

En la Figura 5 se presenta la estructura hipotética de los ácidos fúlvicos.

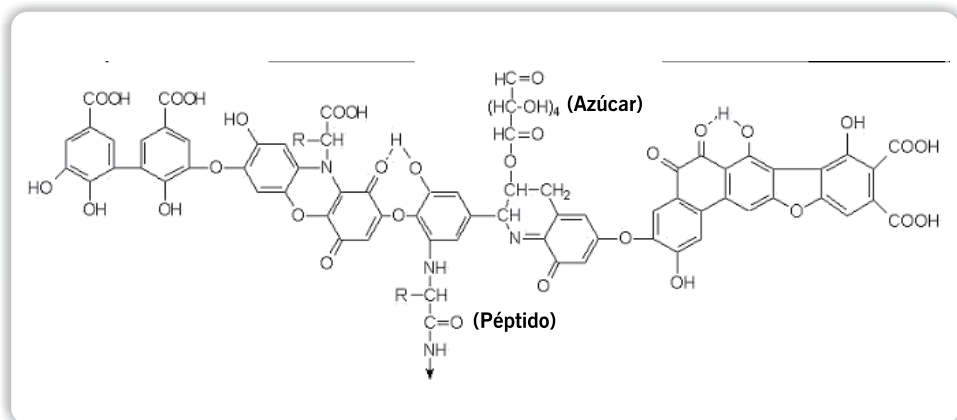


Figura 4. Diagrama estructural de los ácidos húmicos (tomado de Stevenson y Cole, 1999).

**Tabla 2.** Acidez carboxílica de los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) en algunos suelos.

Localidad	Suelo	Acidez carboxílica		Fuente
		(cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )		
	(Orden)	AF	AH	
Chile	Andisol	6,52	3,90	Heredia <i>et al.</i> (19)
Colombia	Andisol	3,84	1,47	Ballesteros <i>et al.</i> (2)
Colombia	Inceptisol	3,36	1,73	Barragán <i>et al.</i> (4)
	Entisol	2,86	2,13	
	Ultisol	3,23	2,53	

### Huminas (HUM)

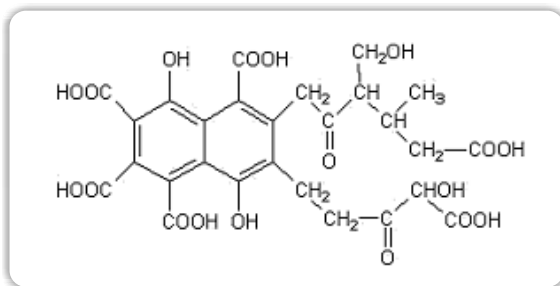
Son polímeros negros, con elevado peso molecular e insolubles bajo cualquier nivel de pH (34). Su participación dentro del C orgánico total del suelo supera en muchos casos el 50% (22). La formación de las HUM se considera el estado final del proceso de humificación, en la cual se presenta una estabilización física y química de los compuestos orgánicos con la fracción mineral del suelo (8).

### Consideración práctica

El procedimiento de extracción en álcali descrito anteriormente, se utiliza también para obtener AH y AF de las turbas, lignitos y leonarditas. Si esta metodología se aplica a un material orgánico compostado, que no haya sido sometido a los factores de formación del suelo, la sustancia resultante parecida al humus, en los textos científicos, se conoce con el nombre de *like humus* (33, 36).

Se ha encontrado, por ejemplo, que de la cachaza (subproducto del proceso de clarificación del jugo de caña de azúcar), pueden aislarse polímeros tipo *Melanoidinas*, que se consideran precursoras de los AH, y que se menciona, hacen parte de la cuarta ruta de la formación del humus. Este tipo de sustancias habitualmente contienen elementos tales como potasio, calcio, magnesio y algunos micronutrientes (28).

El *like humus*, tiene una coloración semejante a la fracción húmica; específicamente, aquel que se obtiene de pulpa de café que ha sido sometida a diferentes modalidades de compostaje, presenta tonalidades pardas muy oscuras. Cuando la materia prima es



**Figura 5.** Diagrama estructural de los ácidos fúlvicos (tomado de Stevenson y Cole, 1999).

compost de gallinaza, el producto resultante no es muy disímil, y corresponde a tonalidades negras (Tabla 3). A pesar de su apariencia y composición química, dichos materiales en ningún caso reúnen las condiciones para ser considerados humus propiamente dicho.

Contrario a lo descrito en el procedimiento de extracción del humus, luego de la extracción con el álcalis, la sustancia resultante no se precipita cuando se somete al tratamiento ácido (Figura 6). Sin embargo, al cabo de unas horas, en la parte superior puede formarse una película amarilla similar a la fracción fúlvica.

### Calidad del humus

Muchos estudios se han enfocado en evaluar la cantidad de los AH en un amplio número de tipos de suelos, pero pocos han determinado su calidad. Una manera de evaluar dicha característica es por medio de los índices de madurez o humificación, los cuales brindan valiosa información referente a los atributos que estos polímeros pueden imprimir en los suelos.

En términos generales, conforme se incrementa el grado de humificación de estas sustancias se dice que poseen una mayor calidad (3) y, por ende, una expresión más significativa de características tales como una mayor afinidad con la fracción mineral del suelo y por consiguiente, mayor resistencia a la síntesis microbiana (aspecto clave para los estudios que tienen que ver con la captura de carbono atmosférico), mejoramiento de propiedades como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la estructura y la estabilidad el suelo, entre otras.



**Figura 6.** Aspecto del *like humus* luego de someterlo a tratamiento ácido.

**Tabla 3.** Color del *like humus* obtenido a partir de diferentes abonos orgánicos de uso común en la zona cafetera colombiana \*.

Material orgánico	Semanas del proceso	Color	Código Tabla Munsell	Color <i>like humus</i>	Código Tabla Munsell
Compost de larvas de díptero	4	Negro	7,5YR 2,5/1	Pardo muy oscuro	10YR 2/2
Compost de pulpa de café	4	Negro	7,5YR 2,5/1	Pardo muy oscuro	10YR 2/2
Lombricompost de pulpa de café	24	Pardo muy oscuro	7,5YR 2/2	Pardo muy oscuro	10YR 2/2
Compost de gallinaza	--	Pardo pálido	10YR 7/3	Negro	10YR 2/1

\*Datos obtenidos por el autor, en el laboratorio de suelos de Cenicafé.

El principio de esta evaluación se basa en el análisis de sus propiedades ópticas, de acuerdo con la absorción de luz en el espectro visible. Los valores de las absorbancias a las longitudes de onda entre 400-480 nm, reflejan las características de absorción de los grupos funcionales predominantes en sustancias húmicas, cuyo proceso de humificación tiende a ser muy incipiente (menor contenido de C y alto nivel de O y de grupos carboxílicos), mientras que los grupos funcionales detectados a través de absorbancias entre 600-670 nm, se relacionan con un material de alto grado de humificación en cuya estructura química predomina una red de compuestos aromáticos y sistemas con doble enlace conjugados denominados grupos cromóforos (moléculas tipo  $-C=C-C=C$  ó  $C=C-C=N-C=C-N-C=$ ), responsables del color oscuro de los AH.

Con base en este criterio, Kumada (23) propone cuatro tipos de humus diferentes, cuya calidad sigue el siguiente orden: humus tipo A > humus tipo B = humus tipo P > humus tipo Rp.

Este sistema de clasificación fue adoptado en condiciones de la zona cafetera colombiana por González *et al.* (15), con el fin de dar explicación a algunos fenómenos físicos y químicos del suelo, que se discutirán más adelante.

## AH Y AF EN SUELOS LA ZONA CAFETERA

Como se ha venido mencionando, pese a que la ciencia del suelo define que el concepto AH y AF es aplicable a un grupo de compuestos que se forman por la mediación de cinco factores formadores y que imprimen en los suelos condiciones muy específicas, algunos reportes de la literatura atribuyen a este recurso cualidades excepcionales como nutricional, hormonal (11, 27, 29, 32) y surfactante (35), por mencionar sólo algunas. Por esta razón, en adelante el presente documento tratará de explicar con base en los resultados obtenidos en Cenicafé por González *et al.* (15, 16), en los suelos descritos en la Tabla 1, la relación entre este importante recurso y algunas variables que se consideran claves al momento de definir la productividad de estos suelos.

### **Concentración de AH y AF en los suelos de la zona cafetera de Colombia**

Estudios adelantados en seis de las principales unidades de suelos de la zona cafetera de Caldas, con dos modalidades de siembra de café, muestran que la concentración de C en los AH puede estar entre 18,6 y 48,3% (Figura 7), valores que en muchos casos son superiores a los citados por Chavarriaga *et al.* (10), quienes reportan en suelos de la zona central cafetera contenidos aproximados a 29,33%.

Con base en los resultados obtenidos, no se cuenta con argumentos suficientes para concluir que el material parental de los suelos seleccionados y el manejo de los mismos, condicionen de manera significativa la concentración de C de AH.

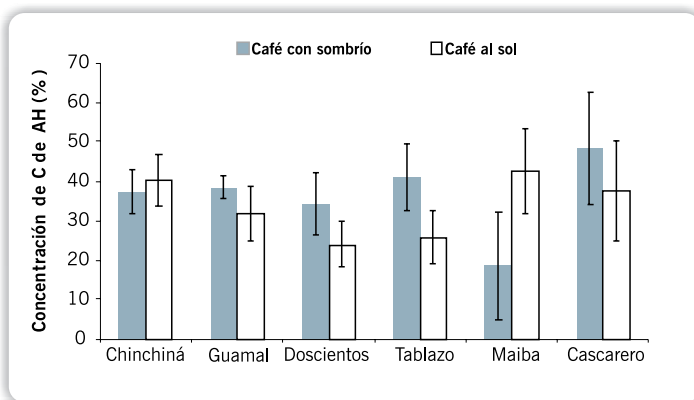
La concentración de C de los AF también fue igual en todas las unidades y sistemas de siembra de café evaluados (Figura 8).

Aunque la literatura registra, para un amplio número de suelos, que la cantidad de C de AH y AF está en proporciones similares, para las condiciones evaluadas, el C de AF fue equivalente a menos de la décima parte del C de AH, condición que puede asociarse con las diferentes interpretaciones que se le da a lo que realmente se extrae por los métodos ya anotados, es decir, en muchas ocasiones la fracción fúlvica es asumida como AF. Sin embargo, en estos estudios, dicha fracción, fue sometida a un proceso estricto de purificación en resinas de intercambio, con el cual se depuraban una serie de compuestos orgánicos no humificados.

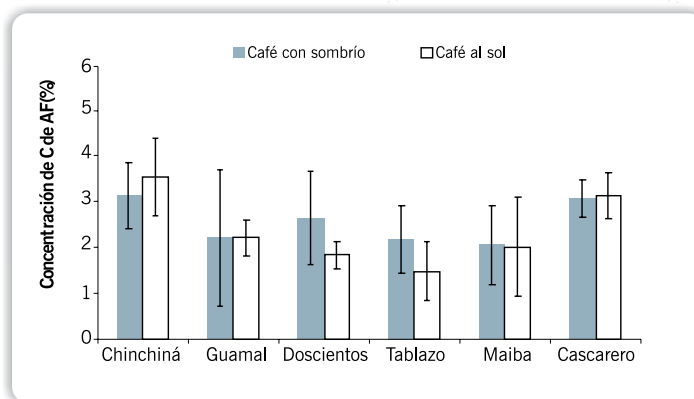
La anterior circunstancia debe recibir especial atención, cuando se trata de asignar propiedades específicas a los AF.

### Consideración práctica

Se estima que en una localidad específica, la cantidad de material orgánico que se incorpora anualmente al suelo está al rededor de 4 t.ha<sup>-1</sup> para café en monocultivo y cerca de las 11 t.ha<sup>-1</sup> en cafetales con sombrío de guamo (*Inga spp.*). En principio, estos datos



**Figura 7.** Concentración de C de AH en suelos de la zona cafetera, con dos sistemas de siembra de café.



**Figura 8.** Concentración de C de AF en suelos de la zona cafetera con dos sistemas de siembra de café.

conducen a pensar que los ecosistemas con sombrero potencialmente generarían mayor concentración de humus en comparación con los de libre exposición solar. No obstante, de acuerdo con los estudios efectuados en la zona cafetera, puede decirse que la aplicación de cantidades conocidas de un material orgánico, no necesariamente se reflejan en una ganancia proporcional del contenido de AH y AF en el suelo. Son los factores de formación de suelos sin exclusión, los que condicionan que haya una mayor o menor cantidad.

Específicamente hablando del factor organismos, la relación C/N y el contenido de ligninas (estructuras precursoras de humus), son características a considerar cuando se tiene por objetivo incrementar el humus en los suelos.

En este sentido, se reporta que los contenidos de lignina para hojas de guamo están alrededor del 19% (24), mientras que para las hojas del cafeto los valores son aproximados al 22% (37). La poca diferencia, puede explicar las similitudes en concentración de AH y AF en las modalidades de siembra de café objeto de estudio.

### Relación entre los AH, los AF y las características físico-químicas en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia

En los trabajos mencionados, se encontró correlación positiva entre el C de AF y la CIC. Aunque el coeficiente es relativamente bajo, puede decirse que los AF y sus grupos funcionales pueden estar contribuyendo no sólo directamente con esta propiedad sino con la carga variable del suelo. Como se mencionó anteriormente, los AF contienen un mayor número de grupos ácidos, que al disociar sus protones, desarrollan cargas negativas (40).

Respecto a otras propiedades químicas del suelo, la concentración de C de AH y AF no correlacionaron con los niveles de P, K, Ca, Mg y S (Tabla 4).

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación entre los contenidos de C de AH, C de AF y algunas variables químicas<sup>1</sup>.

	C AH	C AF	P	K	Ca	Mg	S	Al
C AH								
C AF	0,096							
P	-0,154	-0,068						
K	-0,144	-0,030	0,211					
Ca	-0,179	-0,347*	0,400*	0,354*				
Mg	-0,203	-0,339*	0,119	0,509*	0,759*			
S	-0,092	-0,065	-0,159	-0,008	-0,346*	-0,204		
Al	0,030	0,027	0,004	-0,137	-0,489*	-0,237	0,509*	
CIC	0,062	0,427*	-0,152	0,122	-0,141	-0,113	-0,044	0,041

\* Significativo al 5%

<sup>1</sup>Métodos de análisis: P: Bray II (colorimétrico); K, Ca, Mg y CIC: Acetato de amonio pH 7; S: Turbidimetría; Al: KCl 1M- EAA; C orgánico: Walkley & Black.

La baja o nula relación existente, particularmente con el AI, puede atribuirse a que el método de laboratorio empleado (KCl 1M) no estima la actividad y la concentración de este ion en la solución del suelo, ni en los procesos relacionados como la complejación, tal como lo registran Escobar *et al.* (30), en andisoles de la zona cafetera colombiana.

### **Calidad de los AH y su influencia en las características físicas del horizonte A**

Hablar de calidad del humus implica señalar algunas cualidades en los suelos cultivados. Con base en el sistema de clasificación de Kumada se efectuó una evaluación del grado de madurez de los AH y se buscó la relación entre esta variable y algunas características del suelo, como se discute a continuación.

Al tomar los promedios de las variables involucradas en la calidad de los AH, puede decirse que en general y sin hacer diferenciación entre cafetales al sol y con sombrío, los AH de los mismos fueron clasificados, en su gran mayoría, dentro de la categoría humus tipo P, lo que indica un grado intermedio de madurez.

La manifestación de AH tipo P podría tener relación con el constante aporte de materiales orgánicos que se da en los agroecosistemas destinados al cultivo del café, lo cual no ha permitido que el humus exprese su máximo estado de madurez. Los ciclos de renovación, que van de cinco a seis años, para cafetales tecnificados, y siete años o más, en plantaciones tradicionales con sombrío, favorecen el ingreso significativo de biomasa (tallos, ramas, raíces y hojas), la cual al descomponerse pasa a conformar la MO lábil y, posteriormente, el humus del suelo. Simultáneamente, la superficie del suelo recibe radiación solar directa y por consiguiente, tanto los materiales en proceso de descomposición como el suelo propiamente dicho, tienden a reducir su contenido de agua y a incrementar su temperatura.

Durante el crecimiento y la fase productiva del cultivo se adicionan fertilizantes orgánicos y de síntesis, algunos de ellos como la urea, exhiben una reacción alcalina que contribuyen a solubilizar ácidos orgánicos.

En resumen, la amplia dinámica en los procesos químicos y biológicos que pueden ocurrir en el interior de un cultivo de café pueden dar explicación del por qué no se presentan AH tipo A, calificación que corresponde al mayor grado de expresión, en cuanto a la madurez de este recurso se refiere, y que algunos investigadores sugieren, puede alcanzarse en suelos sometidos a laboreo continuo en temporalidades superiores a los 150 años.

Si bien, la pedogénesis actúa con mayor intensidad en la superficie del suelo y disminuye conforme se profundiza en el perfil (44), no se descarta que a una mayor profundidad a la que ocupan las raíces funcionales del café (> 30cm), puedan hallarse AH en un mayor grado de humificación.

Al efectuar un análisis del sistema de siembra de café al interior de cada unidad de suelos, los resultados fueron los siguientes:

*Unidad Chinchiná:* Tomando como base el criterio de que en la medida que ocurran incrementos en los valores de  $A_{665/C}$  y disminuyan los de  $\text{Log}_{465/665}$  se obtiene un mayor grado de humificación y calidad de los AH, en los suelos de esta unidad pueden hallarse

preferencialmente AH en mediano grado de humificación, sin que exista distinción por efecto del manejo. Sólo en uno de los lotes de libre exposición solar se registraron AH tipo A (Tabla 5).

De acuerdo a lo anterior, el hecho que un suelo sea derivado de cenizas volcánicas, no implica el desarrollo de AH de alta calidad. Shoji y Takahashi (39), en condiciones de Japón, registraron AH tipo B en un horizonte superficial formado a partir de un depósito de cenizas ocurrido en 1914, mientras que en horizontes cuyo origen fueron emisiones de ceniza que datan de hace más de 4.000 años, fueron hallados AH tipo A y tipo B.

En cuanto al color se refiere, no hay un claro indicio para asignar el grado de humificación de los AH de acuerdo a esta variable, situación que se sustenta en que fueron observadas tonalidades negras, pardas (oscuras y muy oscuras) e incluso rojas oscuras. Esta circunstancia deja en entredicho que los suelos con colores muy oscuros (tendientes a negros) son portadores de AH de alta calidad como el de tipo A.

Cabe resaltar que variables como el color y el índice melánico (IM) son criterios que utiliza el sistema de clasificación de suelos para hacer distinción de andisoles al nivel de gran grupo. Particularmente, para aquellos catalogados como andisoles melánicos (presencia de AH tipo A), aparte de tener propiedades ándicas, es requisito que el  $\text{value/chroma}$  esté por debajo de 2/2 (39) y el IM sea inferior a 1,65.

Con base en lo anterior, para las condiciones de esta unidad de suelo considerada dentro del orden andisol, el suelo cuyos AH fueron catalogados tipo A, presentó un color de 10 YR 3/2 y un IM de 1,83. Resultados que reafirman que la variable color puede ser en

**Tabla 5.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Chinchiná.

Modalidad	Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo humus	
Café con sombrío	10 YR 3/2	Negro	4,76	0,35	P
	10 YR 3/2	Pardo muy oscuro	1,76	0,38	P
	10 YR 3/3	Pardo oscuro	5,87	0,27	P
	10 Y 2,5/1	Negro	1,88	0,60	P
	10 YR 3/3	Pardo oscuro	5,16	0,28	P
	10 YR 3/2	Pardo muy oscuro	4,77	0,30	P
	10 Y 2,5/1	Negro	1,94	0,65	P
Café al sol	2,5 YR 3/2	Rojo oscuro	6,81	0,32	P
	10 YR 3/2	Pardo oscuro	10,86	0,33	A
	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	1,20	0,56	P
	7,5 YR 2,5/1	Negro	0,32	0,53	P
	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	0,94	0,65	P
	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	2,81	0,64	P
	10 YR 2/1	Negro	2,01	0,62	P



muchos casos insuficiente y/o subjetiva como para efectuar precisiones en lo que tiene que ver con el uso y manejo del suelo. Aunque es válido anotar también que los índices en mención, se han desarrollado a partir de los estudios de suelos en Japón, por lo que pueden haber ciertas discrepancias.

*Unidad Guamal:* Valores de  $A_{665/C}$  y de  $\text{Log}_{465/665}$  por encima de 7,95 y 0,22 respectivamente, fueron suficientes para que empezar a manifestarse AH de alta calidad, es decir, tipo A (Tabla 6). Este fenómeno, aun más evidente en cafetales a libre exposición solar, se explica porque en estas condiciones en donde se presentaron los mayores contenidos de arcilla (entre 39 y 41%) respecto a las demás unidades, puede haber almacenamiento de humedad y asociado a ello, las altas temperaturas de la zona pueden favorecer el secado inmediato del suelo y la subsecuente condensación de los AH. Bajo este esquema, puede hablarse de una “maduración térmica” de este componente.

Con relación al color, los suelos en donde se encontraron AH tipo A presentaron valores de 4 en chroma, mientras que para los demás suelos los valores fueron menores. Es importante destacar que los suelos del área de trabajo manifestaron procesos de empardecimiento, quizás debidos a la oxidación del hierro presente en sus minerales, que de una u otra forma pudieron enmascarar la coloración típica de los horizontes con alta cantidad y calidad de los AH.

*Unidad Doscientos:* De acuerdo con los valores de  $A_{665/C}$  y  $\text{Log}_{465/665}$ , todos los suelos de esta unidad fueron catalogados como tipo P (Tabla 7).

Al igual que para los dos casos anteriormente presentados, no se mantiene relación alguna entre el tipo de AH y el color del suelo, y se amplía la gama observada para otras unidades pues se presentan tonalidades pardas (oscuras, amarillas y grisáceas) y negras. Como aspecto importante, se presentaron chroma con valor 4 en AH tipo P, esto reafirma la poca relación entre estas dos variables.

*Unidad Tablazo:* La Tabla 8 muestra que los suelos de esta unidad presentaron AH tipo P; los colores fueron pardo muy oscuro y negro rojizo, con valores en el chroma de 2,0 y 2,5 respectivamente, aspecto que no logra explicar de manera satisfactoria el tipo de AH encontrado allí.

**Tabla 6.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Guamal.

Modalidad	Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo Humus	
Café con sombrío	7,5 YR 3/4	Pardo oscuro	7,95	0,34	A
	7,5 YR 3/3	Pardo oscuro	3,79	0,46	P
	5 YR 3/3	Pardo rojizo oscuro	4,83	0,39	P
Café al sol	7,5 YR 4/4	Pardo	11,77	0,31	A
	7,5 YR 4/4	Pardo	21,60	0,22	A
	7,5 YR 2,5/2	Pardo muy oscuro	3,12	0,49	P

**Tabla 7.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Doscientos.

Modalidad		Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo Humus
Café con sombrío	10 YR 3/4	Pardo amarillo oscuro	1,47	0,68	P
	10 YR 3/3	Pardo oscuro	1,29	0,44	P
	10 YR 2/1	Negro	2,13	0,60	P
	10 YR 4/3	Pardo	1,44	0,52	P
Café al sol	10 YR 3/2	Pardo grisáceo oscuro	1,33	0,55	P
	10 YR 3/4	Pardo amarillo oscuro	2,06	0,45	P
	10 YR 3/3	Pardo oscuro	2,88	0,54	P
	7,5 YR 4/6	Pardo fuerte	3,30	0,47	P

*Unidad Maiba:* Similar a lo hallado en la unidad Tablazo, los AH encontrados en los suelos de esta unidad fueron tipo P (Tabla 9). En estos suelos prevalecieron las condiciones de reducción, efecto reflejado por los colores pardo oliva y pardo grisáceo en su perfil.

*Unidad Cascarero:* En esta unidad hubo presencia de AH tipo P y Rp, los cuales se asocian con grados medio y bajo grado de humificación (Tabla 10). Dicho fenómeno se presentó en condiciones con problemas de mesa de agua, aspecto sustentado en la manifestación de colores característicos como grises y olivas en asocio con coloraciones pardas.

Los cafetales ubicados en esta unidad se encontraban en la parte baja de la vertiente, en un relieve muy escarpado, aspectos que representan un impedimento para la formación

**Tabla 8.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Tablazo.

Modalidad		Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo Humus
Café con sombrío	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	2,16	0,31	P
	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	1,60	0,58	P
Café al sol	10 YR 2/2	Pardo muy oscuro	0,80	0,45	P
	2,5 YR 2,5/1	Negro rojizo	0,10	0,44	P

**Tabla 9.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Maiba.

Modalidad		Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo Humus
Café con sombrío	2,5 Y 3/3	Pardo oliva oscuro	1,32	0,74	P
	10 YR 3/2	Pardo gris oscuro	0,45	0,58	P
Café al sol	10 YR 4/4	Pardo amarillo oscuro	0,52	0,66	P
	10 YR 3/4	Pardo amarillo oscuro	0,36	0,77	P

**Tabla 10.** Tipo de AH y color para suelos de la unidad Cascarero.

Modalidad		Color	$A_{665/C}$	$\text{Log}_{465/665}$	Tipo Humus
Café con sombrero	2,5 Y 3/3	Pardo oliva oscuro	0,97	0,81	RP
	2,5 Y 3/3	Pardo oliva oscuro	0,60	0,63	P
Café al sol	10 YR 3/2	Pardo gris muy oscuro	2,00	0,64	P
	10 YR 3/2	Pardo gris muy oscuro	2,65	0,62	P

de un horizonte superficial; por lo tanto, es posible que en menos de diez años (criterio para escoger los lotes) es poco probable que en dichas condiciones haya posibilidad de generar un horizonte A profundo. De allí, que el tipo de AH sea el de menor grado de madurez entre los encontrados para las demás unidades de suelos.

Zapata (44) sostiene que los distintos rasgos pedológicos requieren de tiempos muy variables para su manifestación y son varios los procesos que actúan simultáneamente para dar lugar a un horizonte.

### Consideración práctica

La discusión de los resultados obtenidos, no pretende controvertir todo un conjunto de razones que por décadas han permitido señalar que las tonalidades oscuras o el color negro de un suelo constituyen un indicador de su fertilidad. Más bien se busca crear conciencia de que los suelos portadores de tonalidades diferentes al pardo o negro, no son necesariamente de mala calidad, puesto que la fertilidad del suelo involucra un conjunto de características físicas, químicas y biológicas, que requieren más que de un análisis visual, un análisis de tipo cuantitativo para su evaluación.

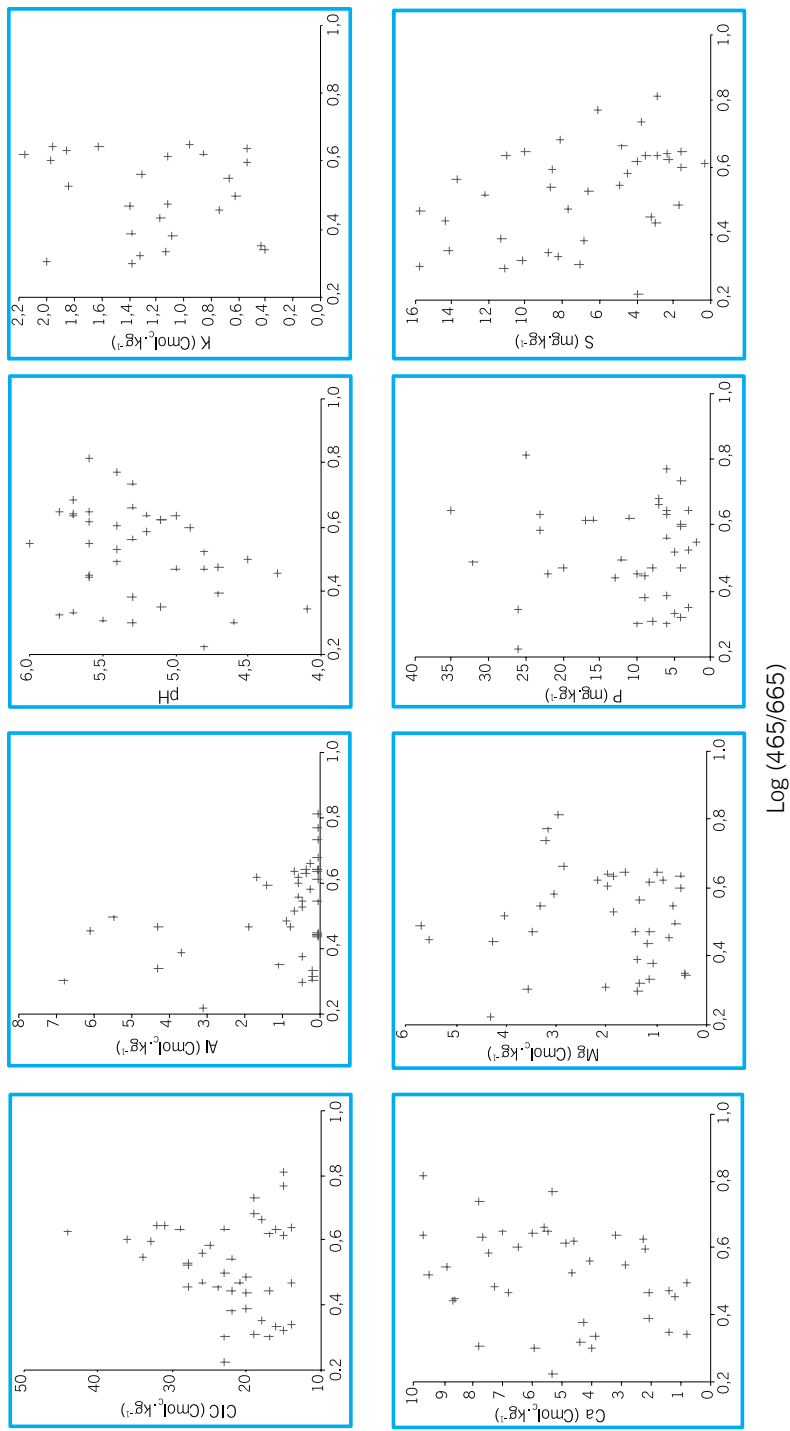
Debe considerarse que el suelo también hereda su coloración del material parental (color litocrómico), algunas veces de manera tan “marcada” como para enmascarar el color del componente orgánico del mismo. Ejemplo de ello, se da en suelos pertenecientes a la unidad cartográfica Villeta, que aflora en la zona cafetera de Cundinamarca y Boyacá, los cuales se caracterizan por presentar un horizonte superficial negro o gris muy oscuro, como consecuencia de los compuestos químicos generados por la meteorización de su material parental (14).

### Calidad de los AH y su influencia en las características químicas del horizonte A

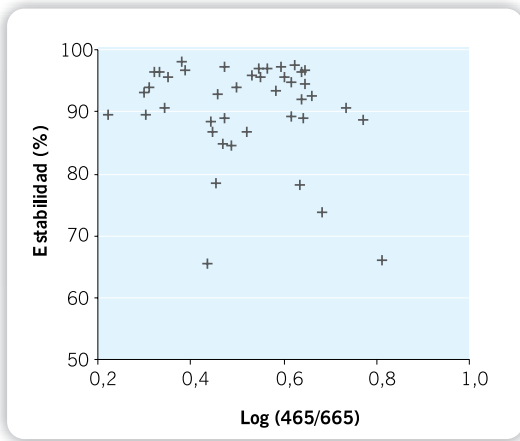
El grado de humificación de los AH no definió tendencias que permitieran explicar cambios en los valores de las variables químicas contempladas en el estudio, dicha situación puede verse en la Figura 9.

Lo anterior puede explicarse debido a que los procedimientos de laboratorio empleados en el presente estudio, no alcanzan a evaluar particularmente la actividad de ciertos cationes en la solución del suelo, que es donde las sustancias húmicas con bajo o intermedio nivel de polimerización pueden entrar a participar activamente.

Se destaca que la mayor proporción de suelos evaluados presentó valores de estabilidad estructural por encima del 90% y que aquellos con niveles menores, coincidieron con presentar AH tipo Rp (Figura 10).



**Figura 9.** Variaciones de algunas características químicas en función del grado de humificación de los AH.



**Figura 10.** Variaciones en los valores de la estabilidad estructural en función del grado de humificación de los AH.

## Consideración final

Los resultados discutidos anteriormente, muestran que el humus no constituye una fuente de nutrimentos, su función principal está relacionada con la formación y estabilidad de la estructura del suelo, aspectos que determinan el almacenamiento de humedad, flujo de aire y solutos suficientes para las funciones vitales de las plantas, macro, meso y microorganismos, y que en su conjunto constituyen parte fundamental de lo que define la fertilidad de los suelos cultivados.

## Literatura citada

1. ANDREUX, F. La materia orgánica del suelo desde la perspectiva pedogenética. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 35 (1): 5-22. 2005.
2. BALLESTEROS J.; BERNAL J.; CORREA A.; CASTRILLÓN W. Caracterización semicuantitativa de las sustancias húmicas de un Acrudixic Melanudands Medial Amórfico isotérmico. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 33 (1): 27-35, 2003.
3. BARANCIKOVÁ, G. Changes of humic acids structure on selected key monitoring localities of arable soils. Rostlinná Výroba 48 (1): 40-44. 2002.
4. BARRAGÁN C.; URIBE, M.; CORREA A.; CASTRILLÓN W. Selectividad y eficiencia de tres agentes extractantes en la extracción de sustancias húmicas en suelos de la amazonía colombiana. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 31 (1): 49-55. 2001.
5. BURBANO O., H. El suelo una visión sobre sus componentes biorgánicos: Pasto (Colombia), Universidad de Nariño, 1989. 447 p.
6. BURDON, J.N. Are the traditional concepts at the structures of humics substances realistic. Soil Science 166: 752-769. 2001.

7. CANELLAS L. P.; BERNER, P.G.; DA SILVA, S.G.; SILVA B. M.; SANTOS DE A. G. Fracoes da materia orgânica em seis solos de una toposequencia no estado do rio de Janeiro. Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Brasil) 35(1): 2-15. 2000.
8. CANELLAS L. P.; AZEVEDO E., J. A.; REZENDE, C. E.; BARBOSA DE C., P.; ZANDONADI, D.B.; RUMJANEK, V. M.; GUERRA M., J.G.; TEIXERA G., M.; BRAZ-FILHO, R. Organic matter quality in a soil cultivated with perennial herbaceous legumes. Scientia Agrícola (Piracicaba Brasil). 61 (1): 1-15. 2004.
9. CARDONA C., D. A.; SADEGHIAN K., S. Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de guamo. Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) N°. 334:1-8. 2005.
10. CHAVARRIAGA, W.; GARCÍA, A.; GARCÉS, N. Fraccionamiento y dinámica de la materia orgánica en suelos de agroecosistemas andinos en el departamento de Caldas- Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 33 (1): 43-51, 2003.
11. COOPER, R. J.; CHUNHUA, L.; FISHER, D.S. Influence of humic substances on rooting and nutrient content of creeping bentgrass. Crop Science 38: 1639-1644, 1998.
12. DA SILVA, I.R.; SA MENDOZA, E. Materia orgánica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V, V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed). Fertilidade de solo. Sociedade Brasileira de la Ciencia do solo. Viosa. 2007. p 276-374.
13. GONZÁLES, L.; HERNÁNDEZ, J.R.; PERESTELO, F.; CARNICERO, A.; FALCÓN, M. A. Relationship between mineralization of syntetic lignins and the generation of hydroxyl radicals by laccase and low molecular weight substance produced by *Petrillidium fusoidium*. Enzyme and Microbial Technology 30: 474-481. 2002.
14. GONZÁLEZ O., H. Consideraciones sobre algunas unidades de suelo de la zona cafetera colombiana. In: INTEGRACION Nacional sobre Nutrición y Fertilización de Café, 1. San Andrés (Colombia), Julio 15-18, 2008. 24 p.
15. GONZÁLEZ O., H.; ZAPATA H., R.D; SADEGHIAN K., S. Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. Cenicafé (Colombia) 60 (1): 25-40. 2009.
16. GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN K., S.; ZAPATA H., R.D.; MEJÍA M., B. Fraccionamiento de la materia orgánica en suelos de la zona cafetera. Cenicafé (Colombia) 59 (4): 311-322. 2008.
17. HAMEL, K. E. Fungal degradation of lignin. In: Driven by nature. Plant litter quality and decomposition (Cadish and Giller ed.). CAB International. Cambridge UK. 1997. P33- 46.
18. HAYNES, J., R. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An Overview. Advances in Agronomy (Estados Unidos). 85: 221-268. 2005.
19. HEREDIA, W.; PEIRANO, P.; BORIE, G.; AGUILERA, M. Soil organic matter-metal interactions in Chilean volcanic soils under different agronomic management. Soil Science and Plant Analysis. 33 (13-14): 2083-2099. 2002.
20. INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY (IHSS). Formación de las sustancias húmicas [en línea]: Colorado (Estados Unidos), <http://www.ihss.gatech.edu/>. [Consulta: Julio 2005].
21. JARAMILLO R., A. Clima andino y el café en Colombia. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 2005. 192 p.

22. KONONOVA, M. M. Soil organic matter; its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Nueva York (Estados Unidos), Pergamon Press, 1961. 450p.
23. KUMADA, K. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press, Tokyo, and Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1987.
24. LEBLANC A., H.; NYGREN, P.; Mc GRAW, L. R. Green mulch decomposition and nitrogen release of two *inga sp* in an organic alley- cropping practice in the humid tropics. Soil biology and biochemistry 38: 349- 358, 2006.
25. LOBARTINI, J.C.; ORIOLI, G.A. Las sustancias húmicas y la nutrición vegetal. Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de la Plata (Argentina) 101(2): 201-209. 1996.
26. LUTZOW, M. V.; KOGEL – KNABNER, I.; ECKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – an review. European Journal of soil science. 57: 426 – 445 (2006).
27. MASCIANDRO, G.; CECCANTI, B.; RONCHI, V.; BENEDICTO, S.; HOWARD, L. Humic substances to reduce salt effect on plant germination and growth. Communication Soil Science Plant Analysis. 33 (3-4): 365-378. 2002.
28. MORALES L., C. S. Disponibilidad del hierro influenciada por la aplicación de ácidos húmicos extraídos de cachaza. Palmira (Colombia), Universidad Nacional de Colombia, 1996. 92 p.
29. NARDI, S.; PIZZEGHELLO, D.; MUSCOLO, A.; VIANELLO, A. Physiological effects of humics substances on higher plants. Soil biology & Biochemistry 34: 1527-1536, 2002.
30. ORTIZ E., M.E.; ZAPATA H., R.D.; SADEGHIAN K., S. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. Cenicafé (Colombia) 57(1):51-57, 2006.
31. PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. Soil Science (Estados Unidos) 166(11):810-832. 2001.
32. PINTO, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. The rhizosphere; biochemistry and organic substances at the soil-plant interface. Nueva York (Estados Unidos), Marcel Dekker, 2001. 424 p.
33. PLAZA, C.; NOGALES, R.; SENESI, N.; BENITEZ, E.; POLO, A. Organic matter humification by vermicomposting of cattle manure alone and mixed two-phase olive pomace. Bioresource Technology 99: 5085-5089. (2008).
34. RICE A, J.; Humin. Soil Science (Estados Unidos) 166(11): 848-857. 2001.
35. ROCHA F., A.; OKOROKOVA F. A.L.; LOPES O., F.; GURIDI, F.; SANTOS DE A, G.; VELLOSO, C. J.; RUMJANEK, V.M.; BRASIL, F.; SCHRISPSEMA, J.; BRAZ-FILHO, R.; DE OLIVEIRA, M.A.; CANELLAS, L.P. Bioatividade de ácidos húmicos: Efeitos sobre o desenvolvimento radicular e sobre bomba de prótons da membrana plasmática. Pesquisa Agropecuaria Brasileira. Brasília, 37 (9): 1301-1310, 2002.
36. ROMERO, E.; PLAZA, C.; SENESI, N.; NOGALES, R.; POLO, A. Humic acid-like fractions in raw and vermicomposted winery and distillery wastes. Geoderma 139: 397-406. (2007).

37. SANTOS B., D.M.; POZZA, D.A.; POZA A.A.A.; CARVALHO, J.G.; BOTELHO, C. E.; SOUZA, P.E. Intensidade da cercosporise em mudas de cafeeiro em funcao da fontes e doses de silicio. *Fitopatologia Brasileira* 30 (6): 582- 588, 2005.
38. SCHNITZER, M. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Advances in Agronomy (Estados Unidos)* 68: 1-58. 2000.
39. SHOJI S.; TAKAHASHI, T. Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global environments research* 6 (2): 113 – 135, 2002.
40. STEVENSON, F.J.; COLE, M. A. Cycles of soil; carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2. ed. New York (Estados Unidos), John Wiley, 1999.
41. TAN, K. H. Humic matter in soil and the environment, principles and controversies. Georgia (Estados Unidos), Marcel Dekker, 2003. 386 p.
42. VANLAUWE, B.; DIELS, J.; SAHINGA, N.; MERCKX, R. Residue quality and descomposition: An unsteady relationship?. *In: Driven by nature. Plant litter quality and descomposition* (Cadish and Giller ed.). CAB International. Cambridge UK. 1997. p157- 166.
43. WILD, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid, 1992. P 595 – 635.
44. ZAPATA H, R. D. Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Medellín (Colombia). Universidad Nacional de Colombia, 2006. 358p.
45. ZAPATA H., R. D. Función de la materia orgánica sobre la movilidad iónica. *Suelos Ecuatoriales* 35 (1): 23-35, 2005.
46. ZECCH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMAN, J.; MIANO, T.; MILTNER, A.; SCHORTTH, G.; Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79 (1197): 117-161. 1



# El compostaje y los índices para evaluar su estabilidad

Raúl Darío Zapata Hernández

Docente, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Cómo citar:

Zapata-Hernández, R. D. (2009). El compostaje y los índices para evaluar su estabilidad. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 33–42). Cenicafé. [https://doi.org/10.38141/10791/0003\\_2](https://doi.org/10.38141/10791/0003_2)

## INTRODUCCIÓN

El compostaje es un proceso biológico, en medio aeróbico, en el cual los sólidos húmedos son transformados a formas más estables llamadas sustancias similares al humus (*like-humic*) o compost (Senesi, 1998). Las principales fuentes de sustratos de materiales para el compostaje son los deshechos de la agricultura (residuos de cosecha y estiércoles), residuos de la industria de alimentos (enlatadoras, cervecerías, lecherías, etc.), desechos de aserríos (aserrín, viruta, etc), la fracción orgánica de los residuos urbanos (basuras separadas en la fuente, lodos de depuradora, las podas de las áreas verdes de la ciudad), deshechos de la fermentación, residuos de papel y celulosa, entre otros.

En el proceso de compostaje exitoso se deben optimizar cuatro parámetros, los cuales son aireación, temperatura, humedad y, algunas veces, el pH (Senesi y Brunetti, 1996). La retención de calor o autocalentamiento es la característica diferencial más importante entre el compostaje y los demás tratamientos anaeróbicos (lodos de depuradoras). En el compostaje se busca que la energía generada en forma de calor sea disipada. Se trata de disponer el material, en tal forma, que las tasas de producción de energía, resultante del metabolismo microbiano, sea superior a la tasa de la energía disipada a través de la superficie de la pila. Las materias altamente biodegradables se suelen añadir a la pila de compostaje para incrementar el metabolismo y generar más calor.

## EL PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje incluye básicamente tres fases:

- Una fase inicial, durante la cual los materiales fácilmente degradables son descompuestos.
- Una fase termófila, durante la cual materiales proteínicos, celulíticos y similares, son degradados con la producción de dióxido de carbono, agua y iones. Se forman compuestos orgánicos estables, se eliminan sustancias fitotóxicas y otros patógenos.

- Una fase de estabilización, en la cual la temperatura declina, disminuye la velocidad de descomposición y la masa es recolonizada por organismos mesófilos. Se llega a material orgánico estable o compost maduro. Un eventual estado de curado, el cual consiste en la prolongación del estado de estabilización y mineralización, y va más allá del estado de madurez.

Se ha dicho que el compostaje es un proceso aeróbico, aunque en la mayoría de las situaciones se producen condiciones anaeróbicas a escala microscópica. No obstante, la biodegradación ocurre en un ambiente oxidado mayoritariamente, si la aireación es manejada adecuadamente.

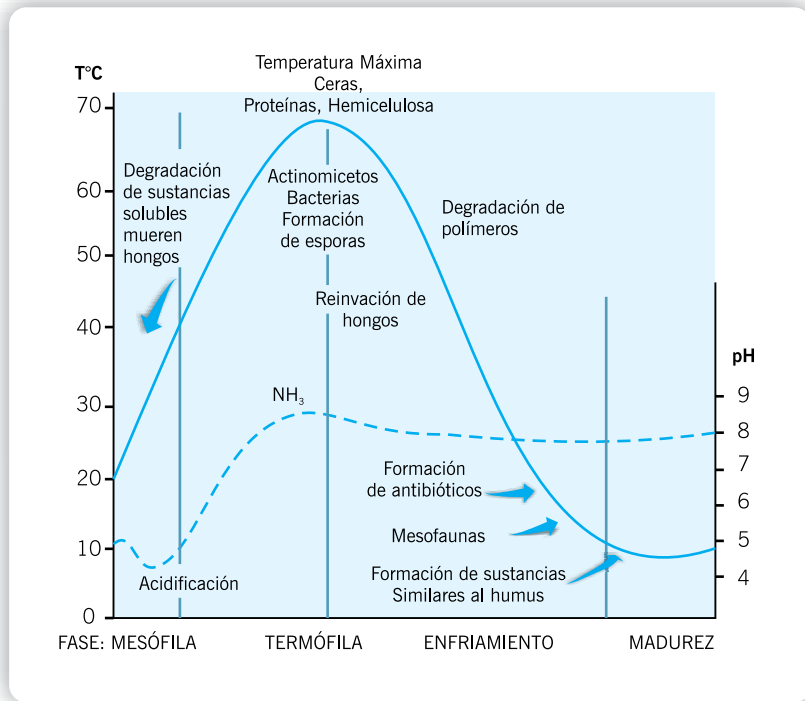
Durante el proceso de descomposición, la materia orgánica es consumida por los organismos y produce dióxido de carbono, agua, calor y otras sustancias. Bajo condiciones óptimas, en cuanto al tiempo, el compostaje pasa por tres etapas: 1) una fase de temperatura moderada o mesófila, la cual puede durar un par de días, 2) una fase de alta temperatura o termófila, que puede durar de varios días a varias semanas, y finalmente, 3) una fase de enfriamiento o de maduración que puede tomar varios meses.

Durante estas fases pueden predominar diferentes comunidades de microorganismos. En la fase inicial, la descomposición es realizada por microorganismos mesófilos, que consumen aquellas sustancias solubles y de fácil degradación como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena corta, entre otros. Se inicia así, un rápido incremento de la temperatura. El calor generado por la actividad metabólica, a medida que sucede la descomposición de los restos orgánicos por parte de los microorganismos, es superior al calor que se disipa.

Los perfiles de temperatura, generalmente comienzan con una fase inicial de corta duración, asociada a la aclimatación de los microorganismos. Después, la temperatura se incrementa en forma exponencial hasta alcanzar un nivel máximo. Si la temperatura entra en el rango termófilo ( $>45^{\circ}\text{C}$ ) se producen cambios sustanciales en la población microbiana. Los microorganismos que son incapaces de tolerar altas temperaturas mueren o forman esporas, mientras que las bacterias termófilas se ven favorecidas y predominan. Sin embargo, si la temperatura alcanza valores más altos ( $55$  ó  $60^{\circ}\text{C}$ ), las bacterias termófilas se ven afectadas y disminuye su actividad.

Normalmente, las pilas de compost pasan por el rango mesófilo ( $30$  a  $40^{\circ}\text{C}$ ) y termófilo ( $50$  a  $60^{\circ}\text{C}$ ). La selección del rango de funcionamiento de una determinada pila de compost, se debe basar en investigaciones realizadas a escala piloto y con los materiales de los que se pueda disponer fácilmente. En la Figura 1, se muestra el perfil típico de temperatura de una pila de compostaje y las fases que determina.

En la Figura 1 se observa que bajo condiciones controladas, la temperatura disminuye tras cierto lapso de tiempo. Esta disminución está asociada con la reducción de las reservas de alimento (Figura 2) y a la constante reducción en la actividad microbiológica. El período de compostaje activo se considera completo a medida que la pila se enfría y las temperaturas dentro de ella, se aproximan a la temperatura ambiente.

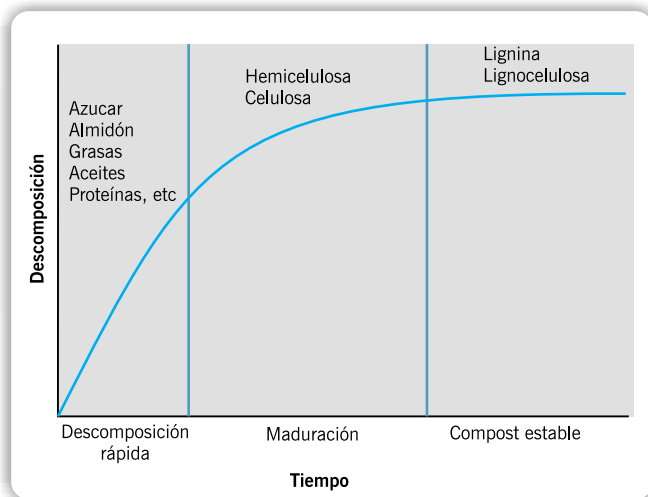


**Figura 1.** Cambios de la temperatura y del pH durante las diferentes etapas del proceso de compostaje.

Otras características del proceso de compostaje son los cambios del aspecto y el olor de la pila. Inicialmente, se distinguen la naturaleza y los olores que identifican al material. Al final del proceso de compostaje el material tiene un olor y aspecto similares a suelo orgánico. En el producto final no se identifican los materiales originales, el tamaño de la pila se reduce drásticamente; además, el color, aspecto y olor, son el resultado de la biodegradación en un medio oxidado de la materia orgánica. Esta conversión de la masa inicial a un producto final estable, semejante al humus, se logra con una pérdida fundamental de dióxido de carbono y agua, principalmente.

Durante la fase termófila, las altas temperaturas ayudan a la descomposición de proteínas, grasas y carbohidratos complejos como celulosa y hemicelulosa, el mayor componente estructural de las plantas. Cuando se termina la suplenia de estos compuestos, fuentes de energía, la temperatura del compost decrece y los organismos mesófilos colonizan de nuevo la pila, y se inicia la fase de maduración o curado de la materia orgánica similar al humus.

Como se muestra en la Figura 2, el proceso de compostaje define cada uno los estados de degradación, enmarcados en el tiempo. El primer estado es de rápida descomposición de los compuestos de alta energía como carbohidratos y proteínas, por parte de las



**Figura 2.** Degradación de distintos tipos de sustancias con el tiempo, en los distintos estados del proceso de compostaje.

bacterias, y ocurre una alta liberación de energía, en forma de calor, dentro de la pila. Con este aumento de temperatura se incrementa la actividad microbiana, que puede llegar a inactivarse cuando alcanza valores muy altos. Durante el segundo estado la población de microorganismos cambia; aquí se distinguen principalmente hongos y actinomicetes, que descomponen celulosa y hemicelulosa, que son compuestos difíciles de desdoblar y producen poca energía. Durante este estado ocurre poca transformación de los compuestos orgánicos de la pila. En el tercer estado, los materiales presentes en el compost continúan su proceso de condensación, llegando a formas más estables.

### Pruebas de evaluación de madurez del compost

No existe una definición universal para caracterizar la madurez del compost (Senesi y otros, 1996). Esta madurez es un nivel particular de estabilidad biológica y de actividad físico-química, que permite la utilización inmediata de la biomasa transformada, para diferentes usos, como son la producción de cultivos, la recuperación del suelo o simplemente para su disposición en el suelo, sin que generen contaminación del agua y el aire, es decir, tener un material ambientalmente limpio.

Los criterios de madurez y calidad del compost incluyen, entre otros, los siguientes análisis:

- Apariencia física
- Relación C/N
- CIC
- Concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$
- Relación  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$
- pH
- Sustancias biodegradables, análisis de fibra cruda
- Test enzimático y microbiológico
- Fosfatasa alcalina

- Bioensayos con plantas
- Índices empíricos de humificación
- Análisis elemental, grupos funcionales, contenido de metales trazas, técnicas espectroscópicas
- Fracción semejante a ácidos húmicos y fúlvicos obtenidos en el compost y su comparación con los correspondientes ácidos húmicos y fúlvicos de los suelos

En general, se espera como indicativo de madurez y estabilidad del compost, que la Relación C/N sea menor o igual a 15, y la CIC, asociada a las sustancias similares al humus, sea igual o mayor a 60 cmol/100 g de compost.

Entre los índices empíricos de humificación se tienen:

### Índice de Humificación (IH):

$$IH = C_{NH} / C_{(AH+AF)}$$

Donde:

NH: fracción no húmica (compuestos orgánicos no humificados extraídos con la solución alcalina),

AH y AF: fracciones de ácido húmico y ácido fúlvico, respectivamente, extraídas con la solución alcalina y separadas por precipitación en medio ácido.

Los valores reportados son:

IH ≤ 1: compost maduro

IH 1-2: compost parcialmente maduro

IH > 2: compost inmaduro

Para la mayoría de los suelos se tiene un IH entre 0,133 y 0,278.

### Índice y relaciones de humificación:

Relación de humificación 1 (HR<sub>1</sub>) : AH/FF

Relación de humificación 2 (HR<sub>2</sub>) : AH/AF

## LAS SUSTANCIAS SIMILARES AL HUMUS

No se puede llamar sustancias húmicas o humus a todo material que se ha transformado biológicamente mediante procesos oxidativos, controlados o no por el hombre, como es el caso del compost (Senesi, 1996; Kumada, 1987). El proceso de humificación de las sustancias orgánicas, ya sean restos orgánicos o materiales compostados, que llegan al suelo, está sometido, al igual que la parte inorgánica, a la acción de los factores formadores del suelo definidos por Jenny (1941), hace más de cinco décadas. Es por esta razón que la producción del humus es un proceso netamente pedológico, fuera de la acción temporal del hombre. Al ser humano sólo le quedan dos opciones: la conserva o la destruye, pero nunca podrá producir sustancias húmicas.

## Índices de humificación

Algunos índices usados para evaluar la humificación de los suelos se han usado para evaluar el proceso de compostaje y la madurez de éste. Los siguientes son los índices más usados:

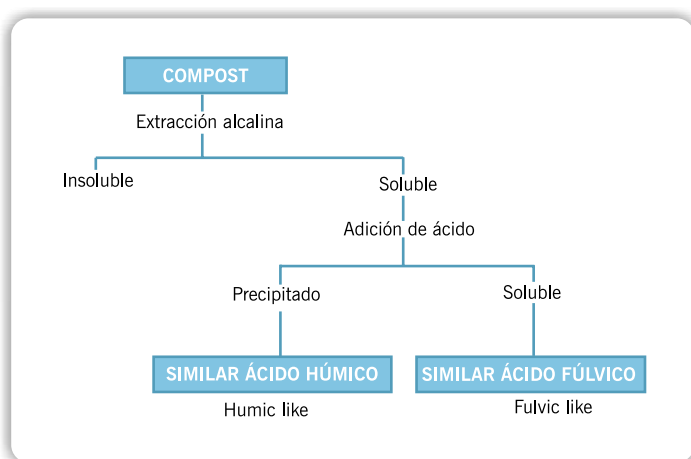
- Relación de humificación:  $100(C_{\text{hum}}/C_{\text{org}})$
- Índice de humificación:  $100(C_{\text{AH}}/C_{\text{org}})$
- Porcentaje de ácidos húmicos (AH):  $100(C_{\text{HA}}/C_{\text{hum}})$
- Relación ácido húmico/ácidos fúlvico:  $C_{\text{AH}}/C_{\text{AF}}$
- Índice RF:  $1000(K_{600}/C_{\text{AH}})$
- Relación de absorción:  $\Delta\log K = \log K_{400} - \log K_{600}$

El  $C_{\text{org}}$  es el carbono total del material medido por combustión húmeda. El valor de  $C_{\text{hum}}$  es el contenido de carbono en el extracto alcalino del material. Los valores  $C_{\text{AH}}$  y  $C_{\text{AF}}$  hacen referencia al contenido de carbono en las fracciones precipitada y soluble en ácido del extracto alcalino.  $K$  se refiere a la absorbancia a 400 y 600 nm, y RF es la cantidad de absorbancia que produce una cantidad de carbono de ácidos húmicos.

El esquema de extracción de sustancias similares al humus, que se le realiza al compost, se presenta en la Figura 3.

En las Tablas 1 a la 3 se presentan los valores elementales de C, H, N y O, los análisis de extractos acuosos y la cantidad de sustancias húmicas y sus fracciones extraídas de las muestras de compost tomadas de la pila, en diferentes períodos, durante el proceso de compostaje de desechos de flores.

De acuerdo con el análisis elemental, en la Tabla 1 se observa que el contenido de C disminuye con el tiempo; esta pérdida es casi del 8% durante los 151 días del proceso.



**Figura 3.** Esquema de extracción de sustancias similares al humus de un compost (Senesi, 1996).

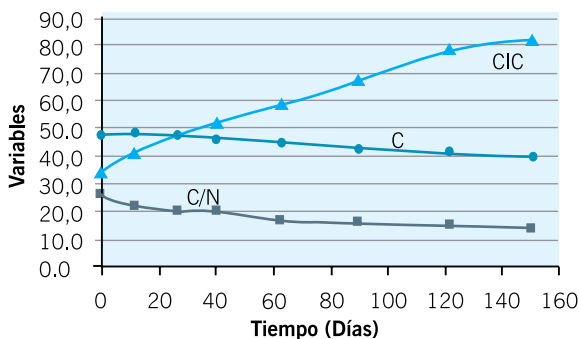
**Tabla 1.** Análisis elemental de los desechos de flores durante el proceso de compostaje de flores (Arango, 1998).

Tiempo (Días)	C	H	N	O	C/N	CIC
	%					meq/100
0	48,78	7,50	2,75	40,58	27,76	34,94
12	49,19	7,54	2,15	40,89	22,83	41,24
27	48,72	7,29	2,03	41,67	21,11	48,54
41	46,94	6,95	2,16	43,63	21,03	52,22
63	45,34	6,69	2,62	45,01	17,08	58,78
90	42,98	6,38	2,54	47,75	16,92	67,68
122	42,31	6,37	2,63	48,25	15,95	78,99
151	40,93	6,22	2,64	49,79	14,99	82,74

El hidrógeno es otro elemento que disminuye durante el proceso. En contraposición, el oxígeno se incrementa.

En contraste con la respuesta de los anteriores elementos, el nitrógeno no muestra cambios durante el proceso de compostaje. Podría pensarse que es un elemento que se recicla en la pila, cambiando de formas químicas, pero manteniendo constante su contenido. Cabe anotar que al disminuir el contenido de carbono y mantenerse constante el contenido de nitrógeno, disminuye la relación C/N.

La capacidad de intercambio de cationes (CIC), se incrementa constantemente durante el tiempo de compostaje. Como la CIC en las sustancias similares al humus, que se están formando durante el proceso, están muy asociadas a grupos funcionales ácidos, que contienen oxígeno, lo cual explica la correlación entre estas dos variable.



**Figura 4.** Variación en el tiempo del contenido de carbono (%), capacidad de intercambio de cationes (CIC, cmol.kg<sup>-1</sup>) y de la relación carbono nitrógeno (C/N), de los desechos de flores, durante el proceso de compostaje de los residuos de flores (Figura elaborada con datos de Arango, 1998).

En la Figura 4, se observan las tendencias del cambio del contenido de C en el tiempo de compostaje, de la relación C/N y de la CIC. El mayor cambio ocurre en la capacidad de retener cationes, posiblemente asociados al aumento del contenido de oxígeno presente en los grupos funcionales ácidos. La disminución de la relación C/N, de 28 a 15, en el tiempo de compostaje es de los mejores índices para el control del proceso (Senesi y Brunetti, 1996, Comunicación personal Prof. Carlos Peláez, Universidad de Antioquia, Medellín).

Otras de las formas de evaluar el proceso de compostaje es por medio de extractos acuosos de compost durante el proceso (Tabla 2). La facilidad de obtener extractos acuosos de las muestras tomadas de la pila de compost, principalmente en las etapas iniciales, hacen de esta metodología una buena práctica para evaluar el proceso.

En Tabla 2 se observa una tendencia similar, con valores menores, debido a que la relación C/N disminuye con el tiempo de compostaje. Los contenidos de C y N aumentan con el tiempo, debido a la extracción que hace el agua de sustancias orgánicas solubles, que no hacen parte del compost. La relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  aumenta en el tiempo, en respuesta a la condición oxidativa del proceso, situación que es inherente a éste.

La relación de absorción a 465 y 665 nm, referida como E4/E6 se ha usado ampliamente con fines de caracterización. Esta relación para ácidos húmicos es usualmente menor de 5,0 y para los ácidos fúlvicos está en el rango entre 6,0 y 8,5. La relación decrece cuando se incrementa el peso molecular y la condensación, por esto se toma como un índice de humificación. Así, valores bajos de la relación E4/E6 pueden indicar un relativo alto grado de condensación de constituyentes aromáticos, e indican la presencia de estructuras alifáticas. Los valores de la relación E4/E6 de extractos acuosos, que se presentan en la Tabla 2, aumentan con el tiempo de compostaje; aun cuando no es posible decir que se tienen estos ácidos en el compost, sí es una medida que se puede utilizar para el control del proceso.

En la Tabla 3 se tienen las cantidades de sustancias similares al humus que se forman durante el proceso de compostaje. Las sustancias similares a la sustancia húmica (SSH)

**Tabla 2.** Análisis de extractos acuosos (1:10), durante el proceso de compostaje de flores (Arango, 1998).

Tiempo	C	N	C/N	$\text{NO}_3/\text{NH}_4$	E4/E6	$\Delta\text{LOGK}$
Días	%					
12	1,23	0,33	3,73	0,15	4,62	0,576
41	1,51	0,43	3,51	2,11	4,35	0,638
63	1,63	0,37	4,40	5,03	5,27	0,722
90	1,63	0,34	4,79	7,23	5,17	0,713
122	2,54	0,46	3,09	7,11	4,74	0,675
151	1,99	0,44	3,09	6,00	5,84	0,767

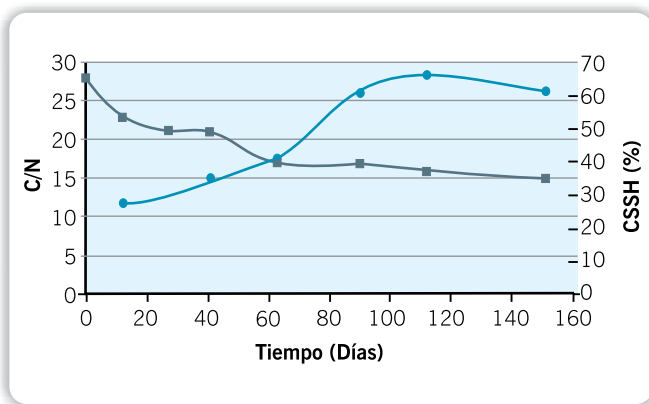


**Tabla 3.** Cantidad de sustancias similares al humus (*like-humus*) y sus fracciones extraídas de compost de desechos de flores (Arango, 1998).

Tiempo	SSH	SAH	SFF	SAF	SFNH
Días	g de C/100g compost				
12	27,31	13,81	13,50	5,48	8,02
41	34,65	19,93	14,72	5,93	8,79
63	41,14	25,44	15,70	6,30	9,40
90	60,91	33,80	17,11	6,79	10,32
112	65,88	47,09	18,80	7,31	11,49
151	61,38	43,97	17,40	7,10	10,31

aumentan con el tiempo del proceso, igualmente que las demás fracciones. El mayor incremento se da en los primeros 90 días para luego estabilizarse en todas las fracciones.

La Figura 5 relaciona dos parámetros que serían buenos indicadores del control de proceso de compostaje. La relación C/N y el contenido de C de la sustancia similar a la sustancia húmica (SSH), no cambian después de que el proceso se ha estabilizado, en este caso a los 90 días, lo cual indica que en estas condiciones el compost ha llegado a una condición estable.



**Figura 5.** Cambios del contenido de carbono de sustancia similar a la sustancia húmica (SSH) y la relación carbono nitrógeno en el tiempo del compostaje de desechos de flores (■ Relación C/N; ● C de sustancias húmicas).

## CONCLUSIÓN

Es posible identificar estados finales de compostaje utilizando índices de humificación. De esta forma se puede eliminar la subjetividad que se tiene para definir el estado final y la calidad del compost, dado que estos índices son constantes en el tiempo, lo cual indica que bajo estas condiciones los materiales orgánicos son estables y estarán listos para ser aportados al suelo, donde se inicia un verdadero proceso de humificación.

### Literatura citada

- Arango, G. 1998. Diseño y montaje de una unidad experimental para evaluar un proceso de compostación: cinética, y parámetros de calidad del compost. Tesis de Master Química, Instituto de Química, Universidad de Antioquia, Medellín, 54 p.
- Jenny, H. 1941. Factors and soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill. New York, 281 p.
- Kumada, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific societies Press. Tokyo. 241p.
- Senesi, N; Miano, T.M.; Brunetti, G. 1996. Humic-like substances in organic amendments and effects on native soil humic substances, Chapter 14. En (ed) Piccolo A. Humic substances in terrestrial ecosystems. Ed. Elsevier Science B. V. Amsterdam.531-593p.
- Senesi, N. 1998. Curso sobre compost y materia orgánica del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Senesi, N.; Brunetti, G.. 1996. Chemical and physico-chemical parameters for quality evaluation of humic substances produced during composting. In: The science of composting. (ed) M. Bertoldi et al. Ed. Blackie Academic and Professional. Londres.195-212p.
- Stevenson, F.J. 1982. Humus chemistry. New York (USA), Wiley. 232p.

# Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas

Nelson Walter Osorio Vega

Docente, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín.

Cómo citar:

Osorio-Vega, N. W. (2009). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 43–71). Cenicafé.  
[https://doi.org/10.38141/10791/0003\\_3](https://doi.org/10.38141/10791/0003_3)

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es presentar algunas funciones de los microorganismos del suelo, los efectos que ejercen sobre la nutrición de las plantas y algunas interacciones entre ellos y su ambiente. En este texto se hace énfasis en el ciclo de nutrientes y en los efectos benéficos de los microorganismos de la rizosfera sobre la nutrición de las plantas. Las condiciones ambientales de la rizosfera y la micorrizosfera también son discutidas, ya que es allí donde ocurren las interacciones entre planta y microorganismos. En general, las plantas pueden liberar carbohidratos, aminoácidos, lípidos, vitaminas, entre otros materiales, a través de sus raíces para estimular los microorganismos en el suelo. El volumen de suelo afectado por estos exudados de la raíz es aproximadamente de 2 mm desde la superficie de la raíz, y es llamado rizosfera. Los microorganismos de la rizosfera participan en el ciclaje geoquímico de los nutrientes y determinan su disponibilidad para las plantas y la comunidad microbial del suelo. Por ejemplo, en la rizosfera hay organismos capaces de fijar  $N_2$  formando estructuras especializadas (p.e. *Rhizobium* y géneros relacionados) o simplemente estableciendo relaciones asociativas (p.e. *Azospirillum*, *Acetobacter*). De otro lado, las bacterias amonificantes y nitrificantes son responsables de la conversión de compuestos de N orgánico a formas inorgánicas ( $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ ), las cuales son disponibles para las plantas. Los microorganismos de la rizosfera pueden también disolver minerales insolubles que controlan la disponibilidad de algunos elementos como el fósforo (P) (tanto nativo como aplicado) a través de la liberación de algunos ácidos orgánicos. Otros microorganismos pueden producir fosfatasas que actúan sobre el P orgánico. La disponibilidad de S, Fe y Mn está también afectada por las reacciones redox, llevadas a cabo por bacterias de la rizosfera. Igualmente, agentes quelatantes pueden controlar la disponibilidad de micronutrientes y participar en mecanismos de biocontrol de patógenos de plantas. Debido a éstos y otros beneficios sobre el crecimiento

de las plantas, algunas bacterias de la rizosfera han sido llamadas Rizobacterias Promotoras del Crecimiento de las Plantas (PGPR, por su sigla en inglés). Los beneficios de las PGPR también han sido obtenidos e incluso aumentados, en presencia de hongos formadores de micorrizas, los cuales por sí solos son importantes en el proceso de absorción de nutrientes de baja difusividad (particularmente P). El término “micorrizosfera” se ha usado para describir la parte del suelo que incluye la rizosfera afectada por los exudados de las hifas de los hongos micorrizales.

## MICROORGANISMOS DEL SUELO

El suelo en sí es un ecosistema muy complejo, éste podría ser considerado como un microcosmos donde minerales y materia orgánica (viva o muerta), el agua y el aire, comparten un espacio de gran actividad físico-química. El suelo es una combinación de fases que interactúan íntimamente entre ellas en un sistema que no tiene comparación. Tal complejidad puede ser percibida por la heterogeneidad de estos componentes minerales y las diversas propiedades físico-químicas que se generan, lo cual varía debido al grado de meteorización del suelo. De manera similar, la materia orgánica es heterogénea, porque puede tener múltiples orígenes y diferentes estados de descomposición.

En un ambiente complejo, su población de habitantes no es menos compleja. Dentro de la población microbial se tienen bacterias, actinomicetos, cianobacterias, hongos, algas, protozoarios y virus. En general, los microorganismos más abundantes en el suelo son las bacterias, aunque los hongos (por su mayor tamaño) representan alrededor del 70% de la biomasa. Torsvik *et al.* (1990) afirmaron que en un gramo de suelo pueden encontrarse 10.000 especies diferentes de microorganismos, muchos de ellos no conocidos, debido a que no pueden ser cultivados. Tal diversidad es también complementada con una alta densidad de microorganismos. En general, en un gramo de suelo seco es posible encontrar  $10^6$ - $10^8$  bacterias,  $10^6$ - $10^7$  actinomicetos y  $10^4$ - $10^5$  hongos. Otros tipos de microorganismos como algas y protozoos, varían entre  $10^3$ - $10^6$ , y  $10^3$ - $10^5$ , respectivamente. Además, la rizosfera, volumen de suelo cerca a las raíces que es afectada por las sustancias orgánicas que aquellas raíces liberan, es más poblada que el resto del suelo. Lazarovitz y Nowak (1997) afirman que desde la perspectiva microbiana, el suelo es un desierto en comparación al ambiente nutritivo de la rizosfera.

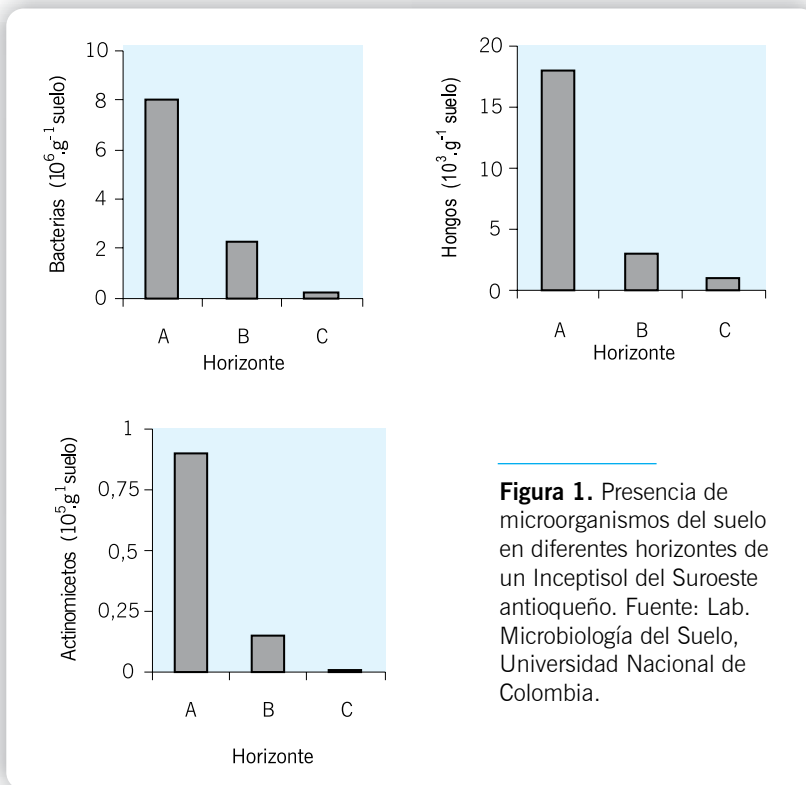
Los microorganismos del suelo son entidades que influyen varios aspectos del suelo y cada uno desempeña diferentes actividades. De particular interés son aquellos microorganismos involucrados en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. Así, en muchos casos, los microorganismos del suelo pueden determinar la disponibilidad de nutrientes y por eso se consideran herramientas para el manejo del suelo y la nutrición de la planta.

La actividad microbial del suelo es bastante diversa y hace parte de los ciclos biogeoquímicos de varios elementos (C, N, O, P y S, entre otros). Como actividades específicas en el suelo se incluyen la descomposición de la materia orgánica y de materiales orgánicos adicionados a éste, la fijación de  $N_2$  atmosférico, la descomposición de minerales primarios, la

mineralización del N-orgánico (nitrificación), la solubilización de P, la oxidación de S, la producción de antibióticos, la formación de asociaciones simbióticas para mejorar la captación de nutrientes por parte de las plantas, la protección de plantas contra patógenos, la descomposición de contaminantes (bioremediación), etc. Es importante considerar que de acuerdo a la forma en que obtienen el carbono (C) y la energía, los organismos se clasifican en heterótrofos, autótrofos y fotótrofos. Los heterótrofos obtienen el C y la energía de la oxidación de materiales orgánicos. Los autótrofos obtienen el C del CO<sub>2</sub> y la energía de la oxidación de sustancias inorgánicas. Los fotoautótrofos obtienen el C del CO<sub>2</sub> y la energía de la luz solar.

La presencia de microorganismos en el suelo es variable, pero sigue la tendencia que a mayor profundidad se disminuye la cantidad de éstos. La razón para ello es que buena parte de los microorganismos que se aíslan en medio de cultivos agarizados son heterótrofos y aeróbicos, y con la profundidad los compuestos carbonáceos y el O<sub>2</sub> disminuyen. En consecuencia, la densidad de las poblaciones microbiales disminuye (Figura 1).

Igualmente, los tipos de microorganismos varían entre suelos, para ilustrar este punto se presenta la Tabla 1. Las razones de tales variaciones están en las diferencias de pH, clima, vegetación, disponibilidad de nutrientes, mineralogía y, muy particularmente, con el tipo y cantidad de materia orgánica.



**Tabla 1.** Presencia de microorganismos en el horizonte A de suelos del trópico (unidades formadoras de colonia, UFC, por g de suelo seco). Fuente: Lab. Microbiología del Suelo, Universidad Nacional de Colombia.

Suelo	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
Oxisol (Hawai)	54x10 <sup>6</sup>	700	6,8x10 <sup>4</sup>
Andisol (Colombia)	5x10 <sup>6</sup>	15x10 <sup>4</sup>	3,5x10 <sup>5</sup>
Mollisol (Colombia)	120x10 <sup>6</sup>	30x10 <sup>5</sup>	3,0x10 <sup>4</sup>

## RIZOSFERA

La rizosfera es la región del suelo que rodea la superficie de la raíz y que está afectada por los exudados que ésta libera. Fue descrita por primera vez por Hiltner (1904). Hay diferentes tipos de sustancias que se liberan desde las raíces y que estimulan la actividad microbial, como son los carbohidratos (azúcares y oligosacáridos), ácidos orgánicos, vitaminas, nucleótidos, flavonoides, enzimas, hormonas y compuestos volátiles. El resultado es una densa y activa población microbial, que interactúa con las raíces y aún dentro de ellas. El efecto de la rizosfera sobre la población microbial puede ser medido al comparar la densidad de la población (unidades formadoras de colonias, UFC) entre la rizosfera (R) y en el resto del suelo no rizosférico (S), para lo cual se utiliza la “relación R/S”. El efecto de la rizosfera es más alto para las bacterias que para los hongos (Tabla 2) y aún más alto para algunos grupos funcionales de bacterias (p.e., amonificantes, denitrificantes). En contraste, las algas exhiben mayor densidad poblacional en el suelo no rizosférico que en la rizosfera. El tipo de plantas puede también afectar la relación R/S, lo cual está asociado con la cantidad y tipo de exudados de la raíz (Tabla 3).

También hay diferencias entre la densidad de población en la superficie de la raíz (rizoplano) y el suelo de la rizosfera. Aunque sobre el rizoplano hay numerosos microorganismos, se estima que sólo 4-10% de su área de superficie total está en contacto

**Tabla 2.** Número de microorganismos (UFC.g<sup>-1</sup> suelo) en la rizosfera (R) de trigo (*Triticum aestivum* L.) y en el suelo el no-rizosférico (S) y su relación R/S (modificado de Gray y Williams, 1971).

Microorganismos	Rizosfera	Suelo no-rizosférico	Relación R/S
Bacterias	1,2 x10 <sup>9</sup>	5,3 x10 <sup>7</sup>	23
Actinomicetos	4,6 x10 <sup>7</sup>	7,0 x10 <sup>6</sup>	7
Hongos	1,2 x10 <sup>6</sup>	1,0 x10 <sup>5</sup>	12
Protozoos	2,4 x10 <sup>3</sup>	1,0 x10 <sup>3</sup>	2
Algas	5,0 x10 <sup>3</sup>	2,7 x10 <sup>4</sup>	0,2
Amonificadores	5,0 x10 <sup>8</sup>	4,0 x10 <sup>6</sup>	125
Denitrificadores	1,26 x10 <sup>8</sup>	1,0 x10 <sup>5</sup>	1.260

**Tabla 3.** Número de bacterias (UFCx10<sup>6</sup>.g<sup>-1</sup> suelo o masa seca de raíz) en el rizoplano y rizosfera de diferentes plantas, y en el suelo no-rizosférico (S) y su relación R/S. Fuente: Rouat y Katznelson (1961).

Planta	Rizoplano	Rizosfera	Suelo no rizosférico	Relación R/S
Trébol Rojo ( <i>Trifolium pratense</i> )	3.844	3.255	134	24
Avena ( <i>Avena sativa</i> )	3.588	1.090	184	6
Lino ( <i>Linum usitatissum</i> )	2.450	1.015	184	5
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	4.119	710	120	6
Maíz ( <i>Zea mays</i> )	4.500	614	184	3
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> )	3.216	505	140	3

físico con los microorganismos del suelo. En la literatura no han sido reportadas diferencias en la rizosfera según el tipo de suelo, pero se sospecha que los suelos que exhiben severas limitaciones para el crecimiento microbial (p.e., suelos ácidos y ricos en Al, que abundan en el trópico) pueden presentar relaciones R/S más altas para las bacterias y otros microorganismos.

La extensión de la rizosfera varía con la planta y el suelo, pero es aceptado que cubre al menos 2 mm desde el rizoplano. Algunos autores han mostrado que la zona de influencia puede ser al menos de 10 mm (Tabla 4). La diversidad de microorganismos es también variable, cerca al rizoplano hay una comunidad diversa pero al aumentar la distancia desde el rizoplano la diversidad se reduce. Papavizas y Davey (1961) encontraron efectos similares sobre actinomicetos y hongos de la rizosfera, esto parece estar asociado con la concentración de carbono en la solución del suelo (exudados de las raíces), la cual disminuye desde el rizoplano.

La liberación de exudados de la raíz puede estar afectada por varios factores en la planta, el suelo y el ambiente. De acuerdo con Bowen y Rovira (1999), las plantas pueden liberar entre 10-30% de fotosintatos a través del sistema de raíces. Whipps y Lynch (1986) encontraron que un mismo factor (p.e., estrés por agua, bajo pH, químicos aplicados al follaje) produce incremento o disminución en la liberación de compuestos orgánicos en

**Tabla 4.** Número de bacterias en función de la distancia desde la superficie de la raíz. Fuente: Paul y Clark (1989).

Distancia (mm)	UFCx10 <sup>9</sup> .cm <sup>-3</sup> suelo	Tipos morfológicos
0-1	120	11
1-5	96	12
5-10	41	5
10-15	34	2
15-20	13	2

diferentes plantas. Las raíces también secretan mucílagos polisacáridos y pierden capas de células en la punta de la raíz al crecer a través del suelo, y así se liberan más compuestos carbonáceos a la rizosfera.

Las condiciones fisicoquímicas que predominan en la rizosfera se pueden usar para entender el papel que juegan los microorganismos sobre la disponibilidad de nutrientes. Por ejemplo, la concentración de oxígeno ( $O_2$ ) en la rizosfera es muy baja debido a la alta demanda requerida para la respiración microbial a partir de compuestos carbonáceos y a la alta densidad microbial. Consecuentemente, la concentración de  $CO_2$  es alta. Estas condiciones crean un ambiente anaeróbico, y se favorecen las reacciones de reducción. En la Tabla 1 se muestra que las bacterias denitrificantes (anaeróbicas) tienen una relación R/S más alta (1260), lo cual facilita la reducción de algunos elementos tales como N, S, Fe y Mn.

El pH de la rizosfera usualmente es de 1-2 unidades más bajo que el del suelo. Varios mecanismos son responsables de este efecto: (i) producción de  $CO_2$  por procesos de respiración que forman  $H_2CO_3$ , (ii) actividad de las bombas de  $H^+$  en la obtención de nutrientes por las plantas y los microorganismos, (iii) liberación de ácidos orgánicos por raíces y microorganismos, (iv) descomposición de la materia orgánica y (v) fijación de  $N_2$  por la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa. Los efectos también pueden variar con la capacidad buffer del suelo y el tipo de planta involucrada. Las condiciones ácidas favorecen la solubilización de minerales del suelo (p.e., fosfatos de calcio). Las características de la rizosfera varían con la especie de planta y las condiciones del suelo. La rizosfera de plantas de arroz de inundación exhibe un ambiente más aeróbico que el resto del suelo. Esto es porque el tejido aerénquima de las plantas de arroz permite el transporte de  $O_2$  a las raíces y su liberación a la rizosfera. Esto facilita la oxidación de Fe y Mn que tienden a incrementar su disponibilidad a niveles que llegan a ser tóxicos para las plantas, dadas las condiciones reductoras de los suelos inundados.

## **RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR)**

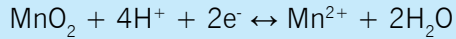
Las bacterias de la rizosfera pueden aumentar el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos por diferentes vías. El acrónimo PGPR (por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente usado para agrupar estos microorganismos. Recientemente se ha propuesto dividir los PGPR en dos categorías: Biocontrol-PGPR y PGPR. Se afirma que esta separación es importante para diferenciar los mecanismos empleados por estas bacterias para promover el crecimiento de las plantas. Biocontrol-PGPR son estrictamente aquellas bacterias que participan en el biocontrol de patógenos de plantas, mientras que PGPR son bacterias que cumplen otras funciones diferentes (p.e., nutricional, hormonal). También se sugiere reemplazar el término rizobacteria por simplemente bacteria, porque algunas bacterias pueden promover el crecimiento de las plantas pero no son habitantes de la rizosfera.

### **Efectos sobre la solubilidad del manganeso**

La disponibilidad de Mn en la rizosfera está afectada por las condiciones redox y el pH del suelo. En suelos oxidados el Mn está presente en su forma oxidada,  $Mn^{4+}$ , en el mineral de baja solubilidad llamado Pírolusita ( $MnO_2$ ). Algunas bacterias de la rizosfera (*Bacillus*,



*Pseudomonas*, *Geobacter*) pueden reducir el Mn oxidado de  $Mn^{4+}$  a  $Mn^{2+}$  que es la forma química metabólicamente usada por las plantas. La reacción es como sigue:



En esta reacción son importantes dos puntos, en primer lugar la reducción de Mn requiere electrones y protones. Los electrones son suministrados por la descomposición de compuestos carbonáceos y los protones pueden ser suministrados por el sistema de excreción de protones de las células de las raíces. Consecuentemente, la actividad de reductores de Mn es altamente favorecida en la rizosfera. Las aplicaciones de materia orgánica también pueden favorecer la reducción de Mn. En suelos alcalinos donde el Mn es usualmente insoluble, el efecto de la rizosfera es benéfico, pero en suelos ácidos con abundancia de minerales de Mn la excesiva reducción de Mn puede inducir a la toxicidad por este elemento, en plantas sensibles. Arines y otros (1992) encontraron que la micorrizosfera puede disminuir la actividad de microorganismos reductores de Mn y favorecer la oxidación del Mn, lo cual podría ser conveniente para el manejo de suelos ricos en Mn.

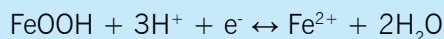
El Mn juega un papel importante en la resistencia de las plantas a las enfermedades. Este elemento, así como el Cu, es requerido para la síntesis de lignina, la cual incrementa la resistencia de los tejidos de las raíces a la penetración de patógenos; consecuentemente, se espera que las plantas deficientes en Mn sean más susceptibles al ataque de patógenos. *Gaeumannomyces graminis*, como muchos otros hongos patógenos del suelo, es un potente oxidante de Mn que dañaría la lignificación de las raíces en los sitios de infección. Los reductores de Mn efectivos de la rizosfera (p.e., *Pseudomonas* sp.) pueden tener efectos benéficos no solo sobre la nutrición de las plantas sino también como biocontroladores de patógenos.

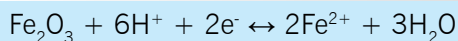
Adicionalmente, las raíces y las bacterias de la rizosfera pueden producir agentes quelatantes (compuestos fenólicos, ácidos orgánicos), capaces de formar complejos solubles con el Mn y otros elementos y así evitar la reprecipitación del Mn.

En contraste, en los suelos inundados donde la disponibilidad del  $Mn^{2+}$  puede ser alta, la oxidación de Mn por bacterias de la rizosfera favorecería el crecimiento de las plantas. Las raíces de arroz liberan  $O_2$  a la rizosfera evitando así los efectos tóxicos por Mn.

## Efectos sobre la solubilidad del hierro

La dinámica del Fe en la rizosfera es muy similar a la del Mn. El Fe del suelo está presente en formas oxidadas como  $Fe^{3+}$ , como un componente de la estructura de minerales insolubles como goetita ( $FeOOH$ ) o hematita ( $Fe_2O_3$ ). Las bacterias de la rizosfera (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Geobacter*, *Alcaligenes*, *Clostridium*, y *Enterobacter*) pueden reducir  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ , la forma requerida por las plantas. Los electrones y protones están disponibles en la rizosfera y consecuentemente, el Fe es reducido, sin embargo éste puede ser reprecipitado. Las reacciones de reducción son:





En condiciones de deficiencia de Fe, algunas bacterias de la rizosfera, particularmente *Pseudomonas* fluorescentes, producen agentes quelatantes (sideróforos) que forman con  $\text{Fe}^{2+}$  complejos solubles disponibles para estas bacterias. Scher (1986) encontró en suelos supresivos para el hongo *Fusarium oxysporium*, que la bacteria *Pseudomonas putida* produjo un sideróforo que capturó el Fe. El complejo sideróforo-Fe puede ser usado por *P. putida* pero no por *F. Oxysporium*, que requiere Fe para sintetizar enzimas que degradan las paredes celulares de la planta. Bajo este sistema la bacteria es un buen agente de control biológico. Sin embargo, al aplicar Fe-EDTA (un fertilizante de Fe), el mecanismo de control sobre *F. oxysporium* desapareció, ya que este hongo puede usar este fertilizante como fuente de Fe. Un fuerte agente quelante de Fe, por ejemplo EDDA, aumentaría el efecto de *P. putida*. Van Peer *et al.* (1990) encontraron efectos similares con EDDHA. De nuevo, los mecanismos relacionados con efectos nutricionales participan en el biocontrol de plantas patógenas.

Por otra parte, el Fe es un componente del grupo “hemo” en las enzimas catalasas y peroxidasas, las cuales son requeridas en la síntesis de lignina. La lignificación de las paredes celulares es una respuesta común de las plantas cuando son desafiadas por fitopatógenos. Aquellas plantas deficientes en Fe pueden ser más vulnerables a los patógenos que aquellas bien abastecidas con el nutriente. En la Tabla 5 se presentan los efectos de la rizosfera sobre el pH y la disponibilidad de Fe, Mn y Zn en suelo y en la rizosfera.

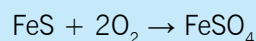
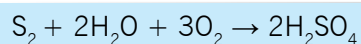
## OXIDACIÓN DEL AZUFRE

La presencia de azufre como ión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) es también el resultado de la actividad bacteriana en el suelo. Existen bacterias (*Thiobacillus oxidans*) que son capaces de oxidar el S elemental o sulfuros, y producir ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), el cual al disociarse libera el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  que es la forma química que la planta absorbe. Una vez está en la solución del

**Tabla 5.** pH del suelo y disponibilidad de micronutrientes (DPTA-extraíble,  $\mu\text{mol.kg}^{-1}$  de suelo) en el suelo y la rizosfera de lupino blanco (*Lupinus albus*). Fuente: Dinkelaker *et al.* (1989).

	Suelo	Rizosfera del suelo
pH	7,5	4,8
Fe	34	251
Mn	44	222
Zn	2,8	16,8

suelo, el ión sulfato puede ser adsorbido sobre los minerales arcillosos o los óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Así mismo, el ión sulfato puede precipitarse con otros iones ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) para formar compuestos insolubles. En ambos casos se genera un equilibrio químico entre estas especies (precipitadas y adsorbida) y el ión en solución.

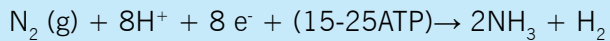


La masiva oxidación de azufre y sulfuros en algunos suelos da origen a los suelos sulfato-ácidos. En éstos, el pH puede ser tan bajo (como 2,5), lo cual no sólo restringe el crecimiento vegetal, sino que las aguas del suelo pueden pasar a corrientes de agua y afectar la vida de los peces.

Por otro lado, cuando cae la hojarasca, ésta enriquece la materia orgánica fresca del suelo. La concentración de S de este material fluctúa alrededor de 0,1-0,3%. Los microorganismos descomponedores de la materia orgánica liberan enzimas que liberan el S de los compuestos que lo contienen (R-SH) y, posteriormente, es oxidado para formar sulfato.

## FIJACIÓN DE N<sub>2</sub>

El N es uno de los nutrientes más limitativos para el crecimiento de las plantas. Algunas bacterias de la rizosfera tienen la capacidad de fijar N<sub>2</sub> en formas orgánicas que pueden ser usadas por las plantas. Las condiciones de la rizosfera favorecen la fijación de N<sub>2</sub> porque ésta es llevada a cabo por bacterias heterótrofas que usan compuestos orgánicos como fuente de electrones para la reducción de N<sub>2</sub>. La reacción simplificada de la fijación de N<sub>2</sub>, es la siguiente:



Esta reacción de reducción es realizada exclusivamente por algunas bacterias, actinomicetos y cianobacterias. La fijación de N<sub>2</sub> la realizan estos microorganismos en forma libre o asociados con plantas y hongos, con estos últimos se hace el proceso más eficiente ya que aportan los ATP y electrones (e<sup>-</sup>) requeridos. Algunas asociaciones simbióticas implican la formación de estructuras especializadas (p.e., nódulos) mientras que otras no forman tales estructuras, pero sí hay intercambio de materiales (p.e., caña de azúcar-*Acetobacter*).

Entre las bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> se destacan las de los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Allorhizobium*, *Sinorhizobium*, y *Mesorhizobium*, que forman simbiosis con leguminosas. En este caso la concentración de O<sub>2</sub> es regulada por la hemoglobina. El suministro de compuestos carbonáceos ocurre en el interior de los nódulos y así se evita la competencia con otros microorganismos. Ésta es sin duda la interacción entre planta y bacteria más estudiada.

Otro fijador de N<sub>2</sub> es *Azotobacter paspali*, el cual crece en la rizosfera de pasturas tropicales tales como *Paspalum notatum* c.v. batatais y *Digitaria* sp., con las cuales exhibe cierto grado de especificidad. Aunque la fijación de 5-25 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N es ampliamente aceptada, valores tan altos como 90 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N han sido reportados. *Acetobacter diazotrophicus* es otro fijador de N<sub>2</sub> que puede crecer dentro del tejido de la raíz ('endorrizosfera') de la caña de azúcar, incluyendo tejidos vasculares donde puede alcanzar una densidad poblacional de 10<sup>6</sup> células/g de estos tejidos. Por su particular localización, *A. diazotrophicus* tiene la ventaja de obtener carbono sin la competencia microbial y

aparentemente puede tolerar una concentración de  $O_2$  más alta que otras bacterias. La caña de azúcar puede obtener 100-150  $kg \cdot ha^{-1}$  de N de esta asociación (Tabla 6).

Una de las simbiosis asociativas más estudiadas es la formada por *Azospirillum* spp. y las raíces de numerosas gramíneas, incluyendo cultivos de cereales importantes. Se han reportado incrementos en el crecimiento y rendimiento de las plantas del 5% al 30%. Los

**Tabla 6.** Valores de fijación de  $N_2$  por bacterias en diferentes sistemas (libre, asociativo o simbiótico). Fuente: Foth y Ellis (1996).

Sistema biológico	$N_2$ fijado ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ )
Microorganismos vida libre	
Cianobacteria	25
<i>Azotobacter</i>	0,3
<i>Clostridium pasteurianum</i>	0,1-0,5
Pastos-simbiosis asociativa	5-25
Caña de azúcar- <i>Acetobacter diazotrophicus</i> <i>Paspalum notatum</i> - <i>Azotobacter</i> <i>Digitaria</i> spp.- <i>Azotobacter</i> Asociativa	Hasta 90
Planta-cianobacteria	
<i>Gunnera</i>	12-21
<i>Azolla</i>	313
Líquenes (hongo-cianobacteria)	39-84
Simbiosis nodulantes con No-leguminosas	
<i>Alnus-Frankia</i>	40-300
<i>Casuarina- Francia</i>	58
Simbiosis con leguminosas	
Soya- <i>Bradyrhizobium</i>	57-94
Alfalfa- <i>Rhizobium</i>	128-600
Caupí- <i>Rhizobium</i>	84
Trébol- <i>Rhizobium</i>	104-160
Lupino- <i>Rhizobium</i>	150-169
Fijación de $N_2$ de rizobios en simbiosis con algunas leguminosas tropicales	
<i>Centrosema</i>	112
<i>Stylosanthes</i>	30-196
Lenteja	35-97
Caupí	73-240
Soya	17-124
Garbanzo	41-279

beneficios parecen deberse a una producción de reguladores de crecimiento de las plantas (auxinas, giberelinas y citoquininas), que estimulan el crecimiento de los pelos radicales, con una mayor obtención de los nutrientes. El efecto favorable no es debido propiamente a la fijación de  $N_2$ . Bashan *et al.* (1999) y Carillo-García *et al.* (2000) han reportado que especies de cactus inoculadas con *A. brasilense* mejoraron su establecimiento y desarrollo en suelos desérticos.

Otras bacterias fijadoras de  $N_2$  no simbióticas como *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus polymyxa* y *Clostridium pasteurianum* han incrementado el vigor de las semillas de maíz, trigo y tomate, y han promovido una floración más temprana en tomate. Quizá la respuesta también se debió a efectos hormonales y no necesariamente a la fijación de  $N_2$ .

Respuestas positivas en el crecimiento de las plantas con fijadores de  $N_2$  pueden esperarse en suelos donde el suministro de N es limitado. Por ejemplo, los suelos desérticos (Aridisoles en la taxonomía de suelos del USDA) tienen muy bajos contenidos de materia orgánica y baja disponibilidad de agua, que restringe el crecimiento de las plantas. Los resultados positivos de Bashan *et al.* (1999) y Carillo-García (2000) soportan esta afirmación. Otro tipo de suelo, por ejemplo, los derivados de cenizas volcánicas, que normalmente presentan baja disponibilidad de N podrían ser favorables para las bacterias fijadoras de  $N_2$ . De manera similar, los suelos erosionados que han perdido la materia orgánica de su superficie o que han estado bajo quemadas, pueden ser rehabilitados con el crecimiento de plantas al usar bacterias fijadoras de  $N_2$ .

Cuando se emplean leguminosas, la inoculación con su simbionte (*Rhizobium* o géneros relacionados) puede mejorar el establecimiento de plantas. Para plantas no-leguminosas, los resultados de la inoculación con fijadores de  $N_2$  de vida libre, tales como *Azospirillum* y *Azotobacter*, pueden ser inciertos. Resultados exitosos han sido obtenidos cuando estas bacterias de la rizosfera son combinadas con plantas que tienen alta eficiencia en la fotosíntesis (plantas  $C_4$ ), así el suministro de C para estas bacterias heterótrofas podría ser satisfactorio.

## Abono verde

Una aplicación práctica de la fijación de  $N_2$  en el manejo de los suelos es el empleo del abono verde. El abono verde consiste en la incorporación de un cultivo en la capa arable

**Tabla 7.** Efecto de la incorporación de azolla en un suelo sobre el contenido relativo de N en plantas de maíz. Fuente: Osorio, no publicado.

Tratamiento	Contenido relativo de N (%)
Testigo (sin azolla, sin fertilizante)	100
<i>Azolla filiculoides</i> como abono verde (50 kg.ha <sup>-1</sup> de N)	155
Urea (50 kg.ha <sup>-1</sup> de N)	125
Urea (100 kg.ha <sup>-1</sup> de N)	198

del terreno, para lo cual se prefiere una leguminosa antes de floración (soya, caupí, etc.). La incorporación de leguminosas en el suelo incrementa el contenido de materia orgánica y el suministro de nutrientes, particularmente N, debido a la alta concentración de este elemento en los tejidos vegetales (~4%) y a la baja relación C:N (~10-12). En la Tabla 7 aparece el efecto de la incorporación de azolla como abono verde en el contenido de N de plantas de maíz .

## **SIMBIOSIS MICORRIZAL**

El término micorriza fue propuesto para describir la asociación simbiótica que se presenta, de manera natural, entre las raíces del 95% de las especies vegetales y ciertos hongos del suelo (mico= hongo; riza=raíz). Es una relación mutualista en la que el hongo coloniza la raíz y proporciona a la planta hospedera agua y nutrientes, que absorbe del suelo a través de su red externa de hifas. La planta por su parte aporta los compuestos carbonados que el hongo utiliza como fuente energética.

La formación de esta simbiosis se constituye es una estrategia exitosa desarrollada por las plantas para superar el estrés que se sucede durante la colonización de ecosistemas terrestres. Existen diferentes tipos de micorrizas, las más estudiadas son la ectomicorrizas y las endomicorrizas. Las ectomicorrizas corresponden a relaciones simbióticas entre hongos Basidiomicetes y Ascomicetes y algunas especies vegetales arbóreas. Las endomicorrizas o micorrizas arbusculares se constituyen en la interacción entre hongos de la clase *Glomeromycetes* y las raíces de casi el 80% de todas las especies de plantas terrestres, incluyendo muchas especies de plantas de interés agrícola y hortícola.

Hay evidencia de la presencia de estos hongos desde el período Devónico, hace 398 millones de años, cuando las plantas acuáticas colonizaron la superficie terrestre. Los hongos micorrizo arbusculares (AMF, de sus siglas en inglés) son biotrofos obligados, es decir, que no pueden ser cultivados y multiplicados en ausencia de una planta hospedera. La razón más aceptada es que el hongo durante la larga evolución de la relación simbiótica, perdió su capacidad para fijar carbono o la maquinaria genética para hacerlo, y llegó a ser completamente dependiente de una planta hospedera para obtener fotosintatos. Aunque se considera que el 95% de las especies vegetales forman asociaciones micorrizales, éstas solo se han examinado en un 3% de ellas y es aún mucho más incipiente la información acerca de su dependencia por la condición micorrizal.

### **Funcionamiento de la simbiosis**

Los AMF no tienen un mecanismo de reconocimiento de un grupo taxonómico de plantas en especial y se conoce que aproximadamente 150 especies de AMF colonizan alrededor de 240.000 especies de plantas. Las estructuras infectivas de los AMF, como las esporas e hifas, germinan y entran en contacto con la superficie de las raíces. La penetración de la raíz ocurre vía apresorio, la formación de esta estructura sólo se da en respuesta a exudados radicales producidos por plantas hospederas. Estas señales incluyen una variedad de isoflavonoides y compuestos fenólicos, comunes a otras interacciones planta-microorganismo.

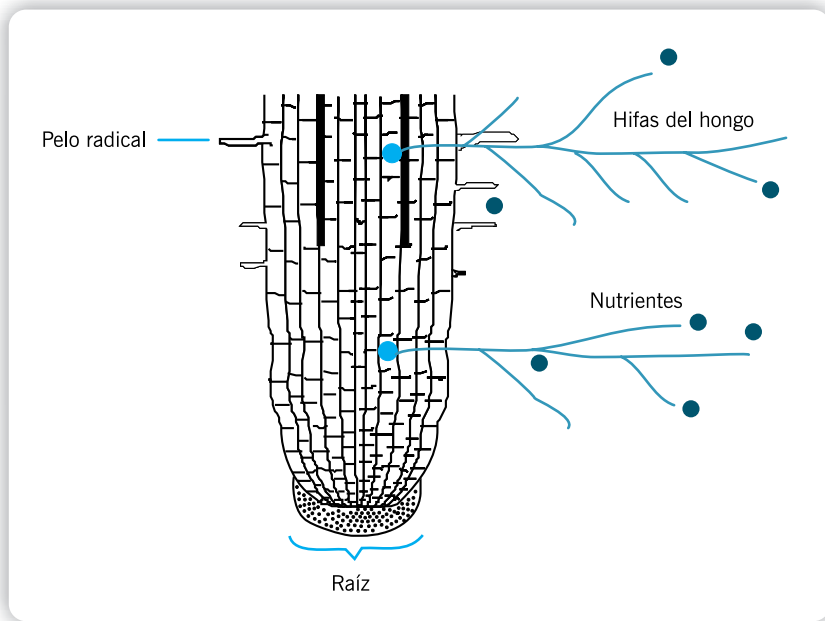
Una vez dentro de las raíces, los AMF producen hifas intercelulares, causando cambios sutiles en la estructura de la pared de las células vegetales. Las terminaciones de las hifas penetran la pared de células corticales y se diferencian dentro de ellas para formar los arbusculos. Aunque la pared celular es atravesada, la membrana plasmática de la célula vegetal permanece sin ser penetrada. Esta membrana se invagina alrededor del arbusculo dando como resultado la formación de un compartimiento apoplástico y se constituye en la interfase simbiótica. Se asume que esta interfase es el sitio de intercambio de carbono y fosfato entre los simbioses. Por lo tanto, se considera que el arbusculo es una estructura clave en la simbiosis. En las asociaciones mutualistas, a diferencia de las asociaciones parasíticas, el transporte de nutrientes es bidireccional.

Es bien documentado el incremento en la captación de nutrientes, principalmente de P, de la solución del suelo por plantas colonizadas con AMF. La captación de P del suelo por los AMF y la subsiguiente translocación y transferencia a la planta huésped permite obtener un nivel equivalente o superior de producción. Los AMF desarrollan una amplia red de hifas extrarradicales alrededor del sistema de raíces de la planta hospedera, lo cual tiene repercusión directa en los aspectos relacionados con la nutrición de la planta. Las hifas externas de los AMF se extienden 10 a 12 cm desde la superficie de la raíz y captan a su paso nutrientes, esto es particularmente importante para captar nutrientes de difusión limitada (P, Cu, Zn). Las hifas superan la zona de captación de P por parte de la raíz, la cual es de 1 a 2 mm desde la superficie radical. Se ha reportado que por cada centímetro de raíz colonizada hay en promedio 1 metro de hifas micorrizales; incluso se han reportado valores de 10 a 14 m de hifas.

Las hifas micorrizales normalmente tienen una mayor afinidad que las raíces para absorber P, es decir, que a diferencia de las raíces, las hifas pueden absorber P a concentraciones muy bajas. Además, debido al pequeño radio de las hifas micorrizales (1-3  $\mu\text{m}$ ) con respecto al de las raíces (150  $\mu\text{m}$ ), no se genera un gradiente de concentración de P alrededor de la hifa, lo que significa que no hay una fuerte zona de agotamiento. Smith y Read (1997) reportaron que raíces micorrizadas exhibieron una absorción de P 3 a 5 veces más alta que raíces sin micorrizas.

Se han propuesto mecanismos bioquímicos y fisiológicos para explicar el incremento en el suministro de P biodisponible por parte de los AMF. Estos mecanismos involucran la acidificación de la rizosfera, el incremento en la actividad fosfatasa de las raíces y la excreción de agentes quelatantes. Sin embargo, lo más aceptado es que la eficiencia de los AMF para la captación de iones fosfato se debe al incremento en el área de suelo explorada por las hifas extrarradicales, por lo que son consideradas una extensión del sistema radical de la planta.

Recientemente se ha encontrado que existen proteínas transportadoras de P de alta afinidad (HATS), acopladas al gradiente de protones producido por las  $\text{H}^+$ -ATPasas. Estas proteínas se expresan en la rizodermis y pelos radicales, y en las hifas extrarradicales y membranas periarbusculares y se constituyen en sistemas simporte que se expresan a bajas concentraciones de P en la solución del suelo y permiten la captación eficiente de iones fosfato. Algunos autores han demostrado que la colonización micorrizal puede alterar la expresión de las proteínas transportadoras de P en las plantas. Según Burleigh y Harrison (1999) existe una regulación negativa de los transportadores de P en las plantas



**Figura 2.** Presencia de hifas micorrizales intra y extrarradicales que captan nutrientes mucho más allá de donde lo obtienen los pelos radicales (dibujo original de N.W. Osorio).

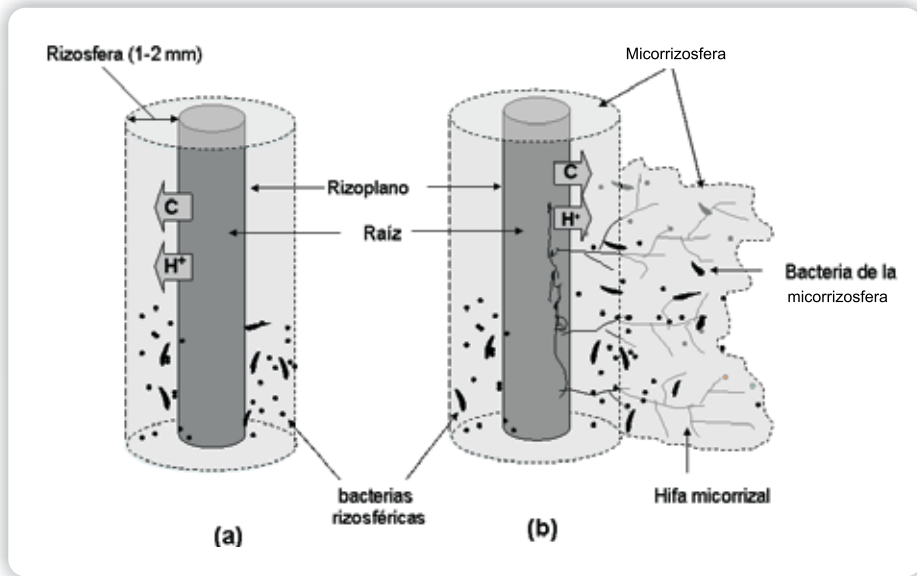
inducida por la colonización micorrizal. Al presentarse una alta concentración de P en el citoplasma de la célula vegetal (debido a la actividad de los AMF) los transportadores de P de la membrana celular se inactivan y la absorción de P recae casi exclusivamente sobre el hongo.

Independientemente de su papel nutricional, la colonización por AMF contribuye significativamente al mejoramiento de la estructura del suelo, incrementa la resistencia de la planta al estrés biótico y abiótico, y favorece el establecimiento de interacciones con otros microorganismos benéficos. La hifa micorrizal también libera compuestos carbonáceos a su alrededor y forma un nicho llamado “micorrizosfera” (Figura 3). Usualmente, los beneficios de los microorganismos de la rizosfera son incrementados en presencia de la simbiosis micorrizal.

### Dependencia micorrizal de las plantas

En algunas especies de plantas la asociación con AMF es indispensable para su crecimiento, sin embargo, el grado de dependencia micorrizal (DM) varía con la especie vegetal. La DM es definida como el grado en el cual una especie de planta depende de la condición micorrizal para alcanzar su máximo crecimiento o producción. Según Plenchette *et al.* (1983) la DM se determina como el porcentaje de la diferencia entre la producción de masa seca total de plantas inoculadas y no inoculadas sobre la producción total de masa seca de plantas inoculadas.





**Figura 3.** Diagrama que ilustra la rizosfera (a) y la micorrizosfera (b) de las plantas (dibujo original de N.W. Osorio).

$$D.M = \frac{\text{Masa seca plantas inoculadas} - \text{Masa seca plantas no inoculadas}}{\text{Masa seca plantas inoculadas}} \times 100$$

Algunos aspectos como la concentración de P en la solución del suelo, la morfología de la raíz y el tamaño de la semilla y su contenido de P son factores determinantes para la DM de las plantas. Por ejemplo, las plantas con raíces gruesas, poco ramificadas y con pocos pelos radicales son usualmente más dependientes de la simbiosis micorrizal que las plantas con raíces finas y ramificadas.

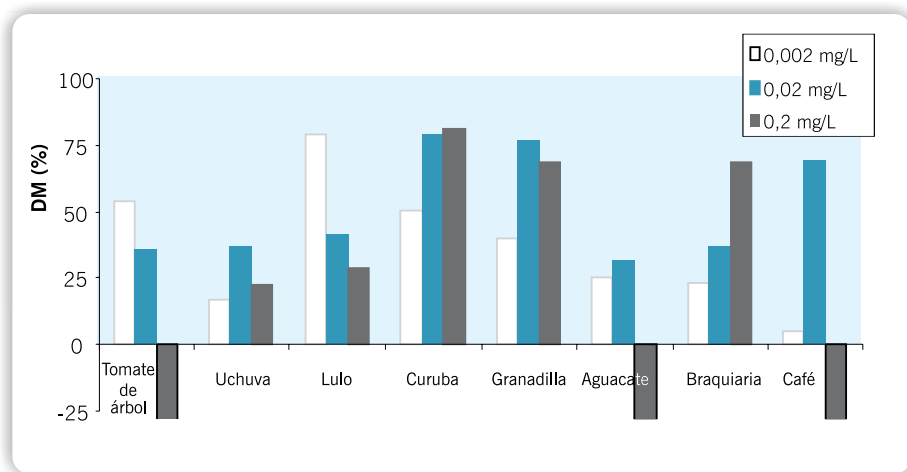
Habte y Manjunath (1991) han propuesto clasificar la DM en cinco categorías. Estos autores usan dos concentraciones críticas de P en la solución del suelo ( $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$  y  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$  para clasificar las especies vegetales así:

- Independiente: especies que no son colonizadas por hongos formadores de micorrizas y que no responden positivamente a la infección micorrizal arbuscular.
- Marginal: especies con una DM de menos del 25% a una concentración de P en la solución del suelo de  $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$ .
- Moderada: especies con una DM de 25-50% a una concentración de P en la solución del suelo de  $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$ .
- Alta: especies con una DM de 50 - 75% a una concentración de P en la solución del suelo de  $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$  y no responden significativamente a la inoculación a  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ .

- Muy alta: especies con una DM  $\geq 75\%$  a una concentración de P en la solución del suelo de  $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$  y responden significativamente a la inoculación a  $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Es evidente que existen diferencias en la dependencia de las plantas por la asociación micorrizo-arbuscular. Entre las altamente dependientes se tienen leucaena, yuca, café, mientras que otras son completamente independientes de tal asociación, como repollo. Además, también se han reportado diferencias en la DM entre cultivares de una misma especie. Este tipo de investigaciones se han llevado a cabo en *Allium fistulosum*, *Lycopersicon esculentum* Mill., *Zea mays* L., *Glycine soja* y *Glycine max*, *Hordeum vulgare* L. y *Glycine max* y *Solanum aethiopicum*.

La DM de algunas especies vegetales de interés económico agrícola y forestal ha sido determinada recientemente (Tabla 8, Figura 4). En general, la DM varía en función del nivel de P disponible en el suelo. Se ha detectado que a concentraciones muy bajas de P en la solución del suelo ( $\sim 0,002 \text{ mg.L}^{-1}$ ) la inoculación micorrizal no aumenta el crecimiento de las plantas. La mejor respuesta a la inoculación micorrizal, en biomasa y absorción de P, se obtiene con una concentración de P soluble de  $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$ . A concentraciones muy altas de P ( $\sim 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ ) la respuesta de algunas plantas a la inoculación micorrizal ha sido variable, en algunos casos el crecimiento ha disminuido y, por ende, el valor de DM es negativo.



**Figura 4.** Dependencia micorrizal (DM) de algunas especies vegetales tropicales de interés económico. Fuente: Osorio, no publicado.

### Inoculación micorrizal

La inoculación hace referencia al proceso de aplicar alrededor del sistema radical de la planta, un sustrato que contenga estructuras infectivas (esporas, hifas, raíces infectadas), con el fin de lograr la colonización de las raíces. La inoculación micorrizal se facilita en

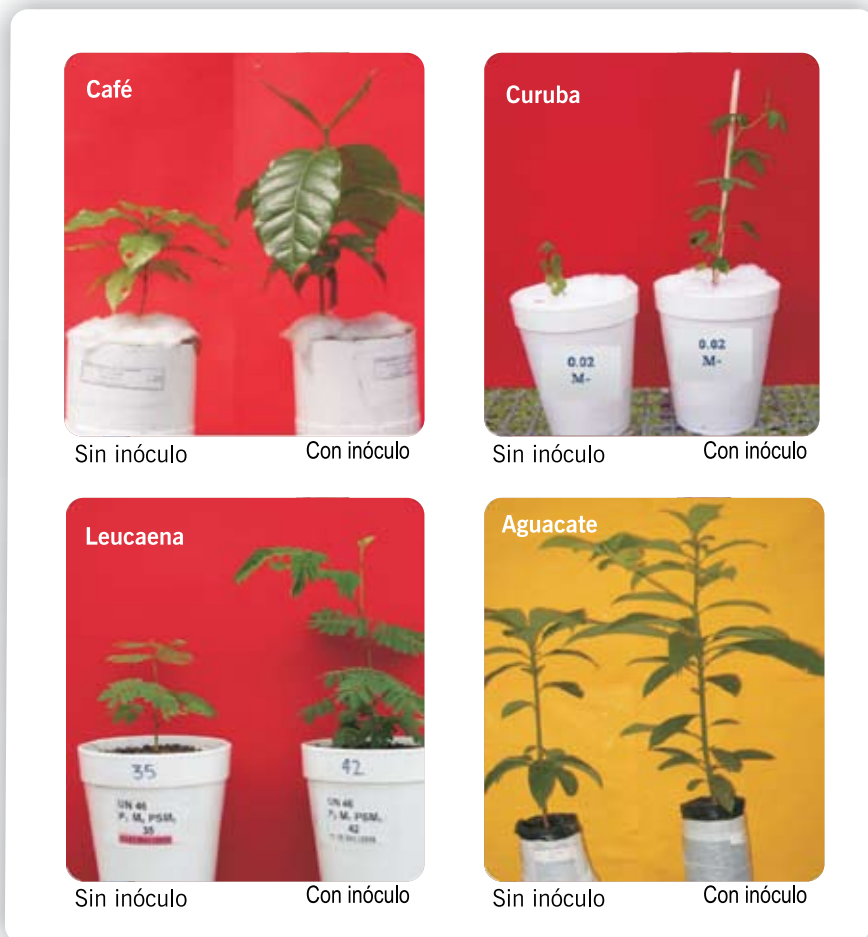
**Tabla 8.** Categorías de dependencia micorrizal (DM) de algunas especies vegetales de interés económico.

Categoría DM	Especie vegetal	Referencia
Independiente	<i>Brassica nigra</i>	Habte y Manjunath, 1991
	<i>Platyciamus regnellii</i> Benth., <i>Ormosia aborea</i> (Vell.), <i>Platypodium elegans</i> Vog., <i>Macheria stipitatum</i> (DC), <i>Myroxylon peruiferum</i> L.f., <i>Hymenaea courbaril</i> L., <i>Dendropanax cuneatum</i> (DC), <i>Ceiba speciosa</i> (St.Hil), <i>Tabebuia roseo-alba</i> (Rid.).	Siqueira y Saggin Junior, 2001
Marginal	<i>Sesbania formosa</i> , <i>S. pachycarpa</i> , <i>S. sesban</i> <i>Cassia reticulata</i> Willd., <i>Chloris gayana</i> Kunth. <i>Hordeum vulgare</i> L. cv. Vodka	Habte y Manjunath, 1991 Habte, no publicado Plenchette y Morel, 1996
Moderada	<i>Acacia mangium</i> Willd., <i>Colocasia esculenta</i> (L.), <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.)	Habte, no publicado
	<i>Leucaena retusa</i> , <i>Sesbania grandiflora</i>	Habte y Manjunath, 1991
	<i>Acacia koa</i>	Miyasaka <i>et al.</i> , 1993
Alta	<i>Manihot esculanta</i> Crantz <i>Sophora crhysophylla</i>	Habte y Byappanahalli, 1994 Miyasaka <i>et al.</i> , 1993
	<i>Cassia siamea</i>	Habte, 1995
	<i>Leucaena diversifolia</i> , <i>Leucaena trichodes</i>	Habte y Manjunath, 1991
	<i>Sesbania tormentosa</i>	Gemma <i>et al.</i> , 2002
	<i>Albizia ferruginea</i> , <i>Allium cepa</i> L., <i>Azadirachta indica</i> A. Juss., <i>Cajanus cajan</i> , <i>Enterolobium cyclocarpum</i> Jcq., <i>Paraserianthes falcataria</i> (L.), <i>Sauropus androgynus</i> (L.)	Habte, no publicado
	<i>Aspidosperma parvifolium</i> A.DC., <i>Solanum granuloso leprosum</i> , <i>Lithraea molleoides</i> (Vell.), <i>Trema micranta</i> (L.)	Siqueira y Saggin Junior, 2001
	<i>Luehea grandiflora</i> Mart., <i>Senna spectabilis</i> (A.DC.), <i>Croton floribundus</i> Spreng, <i>Tibouchina granulosa</i> Cogn., <i>Cecropia pachystachya</i> Trec., <i>Cordia trichotoma</i> (Vell.), <i>Senna macranthera</i> (Collad), <i>Cedrella fissilis</i> Vell., <i>Caesalpinia ferrea</i> Mart., <i>Myrsine umbellata</i> Mart., <i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart.), <i>Sapindus saponaria</i> L., <i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl), <i>Copaifera lagsdorffii</i> Desf.	Siqueira y Saggin Junior, 2001
<i>Leucaena leucocephala</i>	Habte y Manjunath, 1991	
<i>Bidens sandvicencis</i> <i>Glycine max</i> L. cv. Maple arrow	Gemma <i>et al.</i> , 2002 Plenchette y Morel, 1996	

aquellos cultivos que tienen una fase de semillero, vivero o almácigo (Figura 5). En esos casos se puede aplicar el inóculo en el hoyo donde se siembra la semilla o la plántula. También se puede mezclar el inóculo con el sustrato de crecimiento de las raíces. La dosis es variable (20-40 g kg<sup>-1</sup> de suelo) y depende, en buena parte, de la calidad del inóculo.

Antes de inocular un suelo es necesario conocer el grado de dependencia micorrizal de la especie vegetal que se requiere cultivar. Se recomienda la aplicación de inóculo micorrizal cuando:

- Las plantas requieren altas cantidades de P
- La concentración de P disponible es baja



**Figura 5.** Efecto de la inoculación micorrizal sobre el crecimiento de plántulas de café, curuba, leucaena y aguacate. En todos los casos la concentración de P en la solución del suelo fue de 0,02 mg.L<sup>-1</sup>. Fuentes: Jaramillo (2006), Corredor (2007), Montoya (2007), Osorio (2008).

- La población de AMF nativa del suelo es escasa, poco agresiva e ineficaz. Como ocurre en suelos erosionados, degradados o contaminados
- Se ha realizado un manejo intensivo de fungicidas
- La especie vegetal depende de la asociación micorrizal

## Fertilización fosfórica y AMF

En muchos sistemas agrícolas la recuperación del P aplicado por parte de las plantas es muy baja porque más del 80 al 90% del P aplicado no queda disponible en la solución del suelo, particularmente en suelos de la zona tropical y subtropical. El P aplicado puede ser fuertemente fijado en el suelo. El término “fijación de P” es usado en referencia a una serie de reacciones que remueven el P disponible de la solución del suelo, de donde las raíces lo toman directamente. El P puede ser adsorbido fuertemente por minerales arcillosos del suelo y óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Además, el P se puede precipitar al formar compuestos insolubles con iones de Al, Fe y Ca. Sánchez y Logan (1992) estimaron que 1.018 millones de hectáreas en el trópico tienen una alta capacidad de fijación de P. En América tropical hay 659 millones de hectáreas afectadas, 210 en África y 199 en Asia.

Consecuentemente, el P se mueve lentamente hacia la solución del suelo por difusión y la alta tasa de captación por parte de la planta crea una zona de agotamiento alrededor de la raíz, dificultándose así su absorción. Por lo tanto, la tarea de captar este nutriente recae en las hifas de los AMF.

Pese a los efectos benéficos de la aplicación de fertilizantes fosfóricos P en los sistemas de producción agrícola modernos, éste puede llegar a ser un contaminante si logra pasar por escorrentía desde los suelos agrícolas hasta los cuerpos de agua sensibles a eutrofización. El movimiento de P soluble en la superficie del suelo y su transporte asociado a partículas de suelo y material vegetal erosionado puede llegar a aguas donde sea biodisponible para la biota acuática. Un aspecto clave es mejorar la eficiencia en el uso de P del suelo. Ya que los AMF aumentan la captación de P por las plantas, se ha sugerido que estos microorganismos pueden reducir los requerimientos de fertilizantes fosfatados. Tal reducción puede disminuir, al menos en parte, los riesgos de eutrofización en los ecosistemas acuáticos que rodean los suelos agrícolas.

## MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO (PSM)

En años recientes, los microorganismos solubilizadores de P (PSM, por sus siglas en inglés) de la rizosfera han recibido mucha atención. La mayoría de las bacterias del suelo pueden solubilizar fosfatos insolubles, pero son particularmente activas, aquellas que pertenecen a los géneros *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Bacillus*. Así mismo, son particularmente activos como PSM los hongos de los géneros *Penicillium* y *Aspergillus*. Algunos investigadores prefieren usar hongos solubilizadores de P, argumentando que las bacterias pueden perder su habilidad para solubilizar P después de varios ciclos de cultivo *in vitro*, pero este punto es bastante controversial.

La razón para estudiar estos microorganismos es que uno de los problemas más importantes en agricultura tropical es la baja disponibilidad de P en el suelo, como se mencionó anteriormente. Muchos de los suelos tropicales son altamente meteorizados y tienen una alta capacidad de fijación de P, que hace más difícil su manejo. En décadas pasadas se han empleado varias estrategias para reducir la fijación de P, éstas consisten en usar altas dosis de fertilizantes fosfóricos solubles. Sin embargo, la eficiencia de los fertilizantes fosfóricos es baja (5-10%) debido a la alta fijación en los suelos. Una opción viable es el uso de las rocas fosfóricas (RP; apatita), sin embargo, estos materiales son muy insolubles, particularmente en suelos neutros y alcalinos, y siempre se desea un poco más de reactividad.

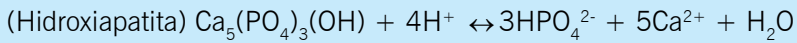
En las décadas de 1950 y 1960, la inoculación con *Bacillus megatherium* var. phosphaticum (fosfobacterin) en suelos de Rusia (principalmente Mollisoles), ha sido la mejor referencia conocida del uso masivo de PSM. Las pruebas que se realizaron en diferentes lugares, mostraron la poca consistencia en la respuesta de las plantas con la inoculación del fosfobacterin. Aparentemente, otros factores tales como el enclamiento y el contenido de materia orgánica del suelo afectaban la efectividad del fosfobacterin para incrementar el P disponible del suelo. El uso del fosfobacterin se desestimó debido a: (i) la falta de respuesta en el rendimiento de los cultivos evaluados en muchos lugares; (ii) la preocupación de que el fosfobacterin aceleraría la descomposición de la materia orgánica del suelo y (iii) el pobre conocimiento de los mecanismos de solubilización de P en ese entonces. Desde entonces, la investigación sobre la solubilización microbial de fosfatos fue orientada a estudiar la disolución de fosfatos inorgánicos.

Un inóculo comercial de un PSM (*Penicillium bilaii*) llamado Provide™ es comercialmente disponible en Norte América y ha sido satisfactoriamente probado en varias plantas para incrementar la absorción de P por la planta. La eficiencia de PSM ha sido cuestionada por algunos autores porque: (i) las sustancias orgánicas requeridas por estos microorganismos son escasas en sitios no-rizosféricos, (ii) existe antagonismo y competencia con otros microorganismos en la rizosfera y (iii) hay baja translocación de fosfatos solubilizados a través del suelo, ya que éstos pueden ser otra vez fijados por componentes del suelo.

### **Mecanismos de la solubilización microbial de fósforo en la rizosfera**

A pesar de las dudas sobre la efectividad de los PSM se han encontrado respuestas positivas sobre el crecimiento vegetal y la absorción de P al inocular el suelo con PSM. Los principales mecanismos involucrados en la solubilización microbial de P son la producción de ácidos orgánicos y la liberación de protones a la solución del suelo. Los ácidos comúnmente reportados por los investigadores de PSM son ácido glucónico, ácido oxálico, ácido cítrico, ácido láctico, ácido tartárico y ácido aspártico. Estos ácidos son el producto del metabolismo microbiano, principalmente por respiración oxidativa o por fermentación de carbono orgánico soluble, por ejemplo la glucosa. La producción de ácidos orgánicos por los PSM se incrementa si la fuente de N es amonio en lugar de nitrato.

Cuando el suelo es inoculado con PSM, los ácidos orgánicos disminuyen el pH de la rizosfera y favorece así la solubilización de las rocas fosfóricas. Considere la siguiente reacción de un fosfato dicálcico del suelo y una hidroxapatita (RP aplicada):



Si la actividad de  $\text{H}^+$  incrementa, las reacciones ocurren hacia la derecha, tal como están escritas. Por otro lado, la presencia de ácidos/aniones orgánicos reduce la actividad de  $\text{Ca}^{2+}$  en los productos de tales reacciones al formar complejos estables con este ión. De esta forma se favorece aún más la liberación del P.

Recientemente, se ha detectado la liberación de ácido oxálico por un hongo solubilizador de P (*Mortierella* sp.) que puede desabsorber el P que se encuentra sobre minerales arcillosos. La capacidad para desabsorber P está controlada por el tipo de suelo y de mineral arcilloso dominante en el suelo. En este sentido, la desorción de P inducida por el hongo ha sido más efectiva, en el siguiente orden:

Mollisol > Oxisol > Ultisol > Andisol

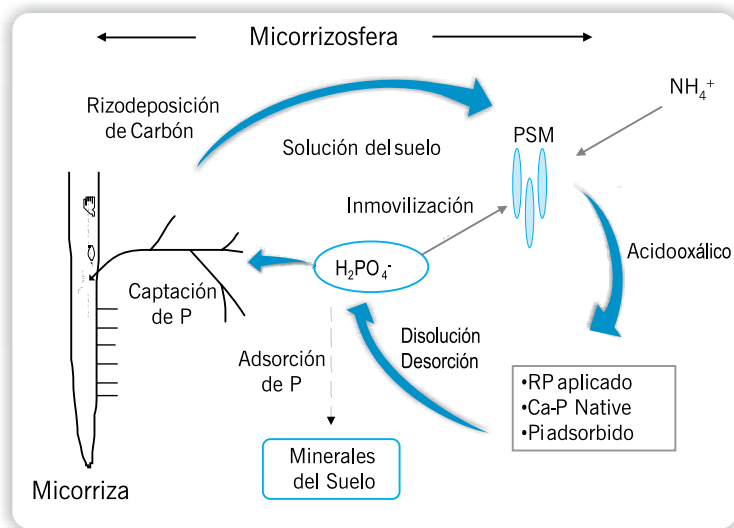
Consecuentemente, se ha detectado que la efectividad en la desorción de P es como sigue:

Montmorillonita > Caolinita > Gibbsita > Alofana

## Interacciones PSM y AMF

Al inocular el suelo conjuntamente con AMF y PSM se puede mejorar la efectividad en la absorción de P solubilizado. Las plantas micorrizadas pueden liberar una mayor cantidad de sustancias carbonadas en su rizosfera (micorrizosfera) que las plantas no micorrizadas, y los PSM ubicados en la rizosfera (o micorrizosfera) liberarían más ácidos orgánicos a la solución del suelo para disolver fosfatos insolubles (P-Ca). Por otro lado, las hifas extrarradicales podrían captar más eficientemente el fosfato liberado por los PSM en la rizosfera (Figura 6), evitando así la fijación.

Kim *et al.* (1998) estudiaron el efecto de la inoculación individual y dual de *Enterobacter agglomerans* (PSM) y *Glomus etunicatum* (AMF) sobre el crecimiento del tomate y la captación de P. Estos autores encontraron un efecto sinérgico sobre el desempeño vegetal cuando ambos microorganismos fueron inoculados en un Alfisol fertilizado con roca fosfórica (Tabla 9). El efecto se debió a una mayor producción de ácido oxálico y, en consecuencia, la roca fosfórica se disolvió y produjo una mayor concentración de P en la rizosfera. En este experimento fue aplicada glucosa como fuente de energía para incrementar la liberación de ácidos orgánicos por el PSM. Resultados similares observaron Osorio y Habte (2001) en leucaena, al inocular un Oxisol de Hawai fertilizado con RP con el AMF *Glomus aggregatum* y el PSM *Mortierella* sp. (Tabla 10). La respuesta a la inoculación con ambos depende del tipo de suelo y particularmente de la capacidad del suelo para fijar P (Figura 7). Osorio (2008) encontró que en un Mollisol (con baja capacidad para fijar P) el PSM fue tan efectivo como el AMF para incrementar el crecimiento de leucaena. En el Oxisol (moderada capacidad para fijar P) el AMF fue efectivo y el PSM inefectivo para mejorar el desempeño de la leucaena, el efecto fue mayor con ambos. En el Andisol (muy alta fijación de P) ni las inoculaciones individuales ni la combinación fueron efectivas.



**Figura 6.** Solubilización microbial de fosfatos en la micorrizosfera y captación micorrizal de P (dibujo original de N.W. Osorio).

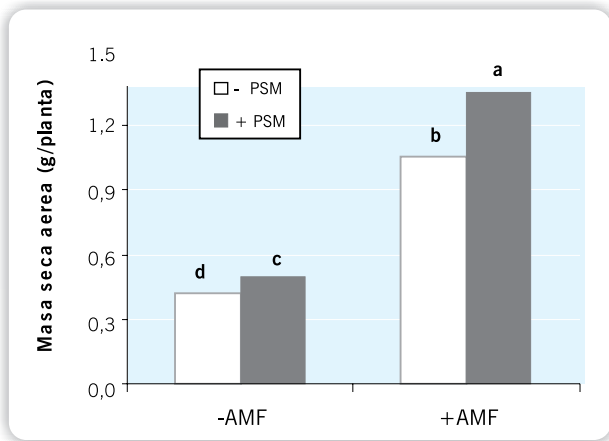
**Tabla 9.** Efectos de la inoculación de *E. agglomerans* (PSM) y *G. etunicatum* (AMF) en el crecimiento y absorción de P en plantas de tomate (75 días después de la inoculación). Fuente: Kim *et al.* (1998).

Tratamientos	Masa seca de la parte aérea (g/planta)	Masa seca de las raíces (g/planta)	P total	
			Parte aérea (g/planta)	Raíces (g/planta)
Control	42,2	4,29	116,46	11,9
PSM	48,49	5,10	125,26	13,6
AMF	47,62	5,57	120,94	13,4
PSM + AMF	54,56	6,77	134,41	16,7
LSD ( $P < 0,05$ )	1,96	0,53	9,85	NS

**Tabla 10.** Efecto de la inoculación con *G. fasciculatum* (AMF) y *Mortierella* sp. (PSM) sobre el crecimiento (g/pote) de leucaena en tres suelos tropicales de Colombia. Adaptado de Osorio (2008). Comparación vertical (Prueba de LSD,  $P \leq 0,05$ ).

Tratamiento	Mollisol	Oxisol	Andisol
	( $P_{0,2} = 45 \text{ mg.kg}^{-1}$ )	( $P_{0,2} = 417 \text{ mg.kg}^{-1}$ )	( $P_{0,2} = 2.222 \text{ mg.kg}^{-1}$ )
PSM	1,18	0,30	0,28
AMF	1,36	0,84	0,28
PSM+AMF	1,48	0,97	0,26
LSD	0,09	0,12	0,09





**Figura 7.** Efecto de la inoculación con *G. aggregatum* (HMA) y *Mortierella* sp. (PSM) sobre la masa seca aérea de *Leucaena leucocephala*. Fuente: Osorio y Habte (2001).

Efectos sinérgicos han sido reportados en girasol (*Helianthus annuus*) con la inoculación triple de *Azobacter chroococcum*, *Penicillium glaucum* y *Glomus fasciculatum*; en pimentón (*Capsicum annuum*) con *G. fasciculatum* o *G. macrocarpum* y *P. striata*; en trigo con *P. putida*, *P. aeruginosa* y *P. fluorescens* en combinación con *G. clarum*. Así mismo, *P. striata* y *G. fasciculatum*. En trigo también se han obtenido resultados positivos con la combinación de dos PSM, *P. striata* y *Agrobacterium radiobacter*, con *G. fasciculatum* y *Gigaspora margarita*, el mayor crecimiento de la planta se obtuvo cuando fueron adicionados estos microorganismos y fertilizantes.

Kopler *et al.* (1988) encontraron más nodulación de rizobios sobre la raíz de una leguminosa al inocular también con el PSM *Pseudomonas* spp. Sturz *et al.* (1997) encontraron que la nodulación de *Rhizobium leguminosarum* b.v. trifolii fue promovida en trébol rojo (*Trifolium pratense*) cuando éste fue co-inoculado con *Bacillus insolitus*, *B. brevis* o *Agrobacterium rhizogenes*. Resultados similares se obtuvieron con la inoculación de *G. mosseae* y *Azorhizobium caulinodans* en *Sesbania rostrata*. En soya la combinación de *Bradyrhizobium japonicum*, *P. fluorescens* y *G. mosseae* ha dado igualmente buenos resultados, debido probablemente a una mayor captación de P, promovida por los PSM y AMF, lo cual puede satisfacer los altos requerimientos de P del proceso de fijación simbiótica de N<sub>2</sub>.

Los PSM también han sido probados en la industria de fertilizantes fosfóricos. Usualmente la roca fosfórica es parcialmente acidulada con ácidos inorgánicos (p.e., H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para incrementar su reactividad, o usada como materia prima para producir más fertilizantes solubles, para lo cual también son adicionados algunos ácidos fuertes. Esto es un proceso costoso debido a los altos costos de los ácidos inorgánicos. Bar-Yosef *et al.* (1999) encontraron que la bacteria *Pseudomonas cepacia*, un conocido PSM, fue muy eficiente para oxidar glucosa y producir ácido glucónico y ácido 2-ketoglucónico en un reactor que contiene RP. Una vez los ácidos fueron disociados, los protones reaccionaron con la RP y liberaron iones fosfato que fueron precipitados con Ca<sup>2+</sup> para formar fertilizantes solubles (superfosfatos). Así, la actividad de los PSM no sólo genera beneficio en su nicho natural, la rizosfera, sino también en otros ambientes.

Los microorganismos del suelo representan una parte integral del suelo. Sus funciones son vitales para la disponibilidad de nutrientes del suelo (fertilidad del suelo). Estos microorganismos determinan la dinámica de la descomposición de la materia orgánica y por consiguiente, liberan nutrientes de ésta a la solución del suelo. Además, participan en diferentes reacciones que incrementan la disponibilidad de nutrientes o su absorción por las raíces. También, los microorganismos del suelo pueden facilitar la pérdida de algunos elementos del suelo (p.e., denitrificación). El conocimiento de tales interacciones puede permitirnos intervenir en el manejo del suelo para maximizar los beneficios de la actividad microbiana del suelo.

## Literatura citada

- Arines J, Porto ME, Vilarino A (1992). Effect of manganese on vesicular-arbuscular mycorrhizal development in red clover plant and soil Mn-oxidizing bacteria. *Mycorrhiza* 1:127-131.
- Asea PEA, Kucey RMN, Stewart JWB (1988). Inorganic phosphate solubilisation by 2 *Penicillium* species in solution culture and soil. *Soil biology and Biochemistry* 20:459-464.
- Atlas R, Bartha R (1997). *Microbial Ecology*. Addison Wesley Longman, New York.
- Azam F, Memom GH (1996). Soil organisms. In: Bashir E and Bantel R (ed.) *Soil science*. National Book Foundation, Islamabad, 200-232 p.
- Azcon C, Barea JM (1996). Interactions of arbuscular mycorrhiza with rhizosphere microorganisms. In: Guerrero E (ed.) *Mycorrhiza: Biological soil resource*. FEN, Bogotá, Colombia, 47-68 pp.
- Barber SA (1995). *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach*. John Wiley and Sons, New York.
- Bar-Yosef B, Rogers RD, Wolfram JH, Richman E (1999). *Pseudomonas cepacia*-mediated rock phosphate solubilization in kaolinite and montmorillonite suspensions. *Soil Science Society of America Journal* 63:1703-1708.
- Bashan Y, Holguin G (1998). Proposal for the division of Plant Growth Promoting Rhizobacteria into two classifications: Biocontrol-PGPB and PGPB. *Soil Biology and Biochemistry* 30:1225-1228.
- Bashan Y, Rojas A, Puente ME (1999). Improved establishment and development of three cactus species inoculated with *Azospirillum brasilense* transplanted into disturbed urban desert soils. *Canadian Journal of Microbiology* 45:441-451.
- Bass R (1990). Effects of *Glomus fasciculatum* and isolated rhizosphere microorganisms on growth and phosphate uptake of *Plantago major* spp. pleiosperma. *Plant and Soil* 124:187-193.
- Bolan NS (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 134:189-207.
- Bolan NS, Naidu R, Mahimairaja S, Baskaran S (1994). Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates. *Biology and Fertility of Soils* 18:311-319.
- Burleigh SH, Harrison MJ (1999). The down-regulation of Mt4-Like genes by phosphate fertilization occurs systemically and involves phosphate translocation to the shoots. *Plant Physiology* 119: 241-248.

- Bowen GD, Rovira AD (1999). The rhizosphere and its management to improve plant growth. *Advances in Agronomy* 66:1-102.
- Carillo-García A, Bashan Y, Diaz E, Bethlenfalvai GJ (2000). Effects of resource-island soils, competition, and inoculation with *Azospirillum* on survival and growth of *Pachycereus pringlei*, the giant cactus of the Sonoran desert. *Restoration Ecology* 8 (1):65-73.
- Chanway CP (1997). Inoculation of tree roots with plant promoting soil bacteria: an emerging technology for reforestation. *Forest Science* 43 (1):99-112.
- Corredor A (2007). Dependencia micorrizal de curuba y granadilla. Tesis de grado Biología, U de A, Medellín.
- De la Fuente JM, Herrera L (1999). Advances in the understanding of aluminum toxicity and the development of aluminum tolerant transgenic plants. *Advances in Agronomy* 66:103-121.
- Dinkelaker B, Romheld V, Marschner H (1989). Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus*). *Plant Cell Environment* 12:285-292.
- Engelstad OP, Terman GL (1980). Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In: Khasawneh FE, Sample E, Kamprath E (ed.) *The role of phosphorus in agriculture*. Soil Science Society of America, Madison, WI, 311- 332 pp.
- Foth HD, Ellis BG (1996). *Soil fertility*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Frankenberg WT, Arshad M (1995). *Phytohormones in soils: microbial production and function*. Dekker, New York.
- Freitas JR, Banerjee MR, Germida JJ (1997). Phosphate solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.). *Biology and Fertility of Soils* 24:358-364.
- Germida JJ, Walley FL (1996). Plant growth-promoting rhizobacteria alter rooting patterns and arbuscular mycorrhizal fungi colonization of field-grown spring wheat. *Biology and Fertility of Soils* 23: 113-120.
- Graham PH (1999). Biological dinitrogen fixation: symbiotic. In: Sylvia D, Fuhrmann J, Hartel P, Zuberer D (ed.) *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 322-368 pp.
- Graham RD, Webb MJ (1991). Micronutrients and plant disease resistance and tolerance in plants. In: Morvedt J, Cox FR, Shuman LM, Welch RM (ed.) *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America, Madison, WI, (Books series No.4), 329-370 pp.
- Gray TRG, Williams ST (1971). Microbial productivity in soil. In: Hughes D, Rose AH (eds) *Microbes and microbial productivity*, 21<sup>st</sup> Symp. Soc. Gen. Microbiol. Cambridge Univ. Press, London 255-286 pp.
- Habte M, Manjunath A (1991). Categories of vesicular-arbuscular dependency of host species. *Mycorrhiza* 1:3-12.
- Hammond L, Leon L (1992). Evaluation of the North Carolina natural phosphate as a phosphoric fertilizer. *Suelos Ecuatoriales* 22:143-150.

- Havlin J, Beaton J, Tisdale SL, Nelson W (1999). Soil Fertility and Fertilizers. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- He ZL, Zhu J (1998). Microbial utilization and transformation of phosphate adsorbed by variable charge minerals. *Soil Biology and Biochemistry* 30:917-923.
- Hiltner L (1904). Uber neue Erfahrungen und probleme auf dem gebiet der bockenbakteriologie und unter besonderer bercksichtigung der grundungung un brache. *Arb. Dtsch. Landwirt. Ges* 98:59-78.
- Hue NV, Silva J, Uehara G, Hamasaki RT, Uchida R, Bunn P (1998). Managing manganese toxicity in former sugarcane soils of Oahu. Honolulu, Cooperative Extension Service, University of Hawai'i.
- Hue NV, Vega S, Silva J (2001). Manganese toxicity in a Hawai'i an Oxisol affected by soil pH and organic amendments. *Soil Science Society of America Journal* 65:153-160.
- Hue NV (1991). Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Science* 152:463-471.
- Ingham E (1999). Protozoa and nematodes. In: Syla D, Furhmann JF, Harte PG, Zuberer DA (eds) *Principles and applications of soil microbiology*. Prentice Hall, New Jersey, 114-131 pp.
- Jaramillo S (2006). Dependencia micorrizal del cafeto cv. Colombia y Caturra. 2006. Tesis de Maestría en Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Kenedy A (1999). The rhizosphere and spermosphere. In: Sylvania D, Fuhrmann J, Hartel P, Zuberer D (eds) *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 389-407 pp.
- Kim KY, McDonald GA, Jordan D (1997). Solubilization of hydroxyapatite by *Enterobacter agglomerans* and cloned *Escherichia coli* in culture medium. *Biology and Fertility of Soils* 24:347-352.
- Kim KY, Jordan D, McDonald GA (1998). Effect of phosphate solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity. *Biology and Fertility of Soils* 26:79-87.
- Kopler J, Lifshitz R, Schroth M (1988). *Pseudomonas* inoculants to benefit plant production. *Isi atlas of science, animal and plant sciences* 1:60-64.
- Kucey RMN (1983). Phosphate solubilising bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. *Canadian Journal of Soil Science* 63:671-678.
- Kuenen JG, Robertson LA (1994). Combined nitrification-denitrification processes. *FEMS Microbiological Reviews* 15:109-117.
- Lazarovitz G, Nowak J (1997). Rhizobacteria for improvement of plant growth and establishment. *Hort Science* 32:188-192.
- Linderman RG (1988). Mycorrhizal interaction with the rhizosphere microflora: The mycorrhizosphere effect. *Phytopathology* 78:366-371.
- Lindsay W (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Wiley and Sons, New York.

- Marschner H (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. London, Academic Press.
- Marschner H, Dell B (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. In: Robson AD, Abott LK, Malaccjuk N (eds) Management of mycorrhizas in agriculture, horticulture and forestry. Academic publishers, the Netherlands, 89-102 pp.
- McCully M (1999). Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50:695-718.
- Meeting FB (1993). Structure a physiological ecology of soil microorganisms. In: Meeting FB (ed.) Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management. Marcel Dekker, New York, 3-25 pp.
- Mohod S, Gupta DN, Chavan AS (1991). Effects of P solubilizing organims on yield and N uptake by rice. Journal of Maharashtra agricultural universities 16 (2):229-231.
- Montoya B (2007). Dependencia micorrizal del aguacate. Tesis de Maestría en Geomorfología y Suelos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Mullen MD (1999). Transformations of other elements. In: Sylva D, Furhmann JF, Harte PG, Zuberer DA (eds) Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall, New Jersey, 369- 386 pp.
- OkonY (1994). *Azospirillum* plant associations. CRC Press, Boca Raton, Fl.
- Osorio, N.W. (2002). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo en suelos de Hawaii. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Osorio NW (2008). Effectiveness of microbial solubilization of phosphate in enhancing plant phosphate uptake in tropical soils and assessment of the mechanisms of solubilization. Ph. Dissertation, University of Hawai'i, Honolulu.
- Osorio NW, Habte M (2001). Synergistic influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and P solubilizing fungus on growth and plant P uptake of *Leucaena leucocephala* in an Oxisol. Arid Land Research and Management. 15:263-274.
- Papavizas GC, Davey CB (1961). Extent and nature of the rhizosphere of Lupinus. Plant and Soil 14:215-236.
- Patgiri I, Bezbaruah B (1990). Strains contributing to phosphorus mobilization in acid soils. Indian Journal of Agricultural Sciences 60 (3):197-200.
- Paul EA, Clark FE (1989). Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, New York, 49-73 pp.
- Plenchette C, Fortin J A, Furlan V (1983). Growth response of several plant species to mycorrhiza in a soil of moderate P fertility. Plant Soil 70:199-209.
- Prathibha CK, Alagawadi A, Sreenivasa M (1995). Establishment of inoculated organisms in rhizosphere and their influence on nutrient uptake and yield cotton. Journal of Agricultural Sciences 8(1):22-27.
- Premono E, Anas I, Soepardi G, Hadioetomo R, Saono S, Sisworo W (1994). Isolation and selection of phosphate-solubilizing microorganims from a sugarcane plantation. Majalah Perusahaan Gula 30:3-4, 25-29.

- Prescott L, Harley J, Klein DA (1999). Microbiology. McGraw-Hill, Boston.
- Rahman MK, Parsons JW (1997). Effects of inoculation with *Glomus mosseae*, *Azorhizobium caulinodans* and rock phosphate on the growth of and nitrogen and phosphorus accumulation in *Sesbania rostrata*. *Biology and Fertility of Soils* 25:47-52.
- Rambelli A (1973). The rhizosphere of mycorrhizae. In: Marks, G.C. and Kozlowski (eds.) *Ectomycorrhizae, their ecology and physiology*. Academic Press, London, 299-343 pp.
- Rao S (1992). Biofertilizers in Agriculture. El Sevier publishing, Amsterdam.
- Rokade SM, Patil P (1993). Phosphate solubilizing microorganisms. A review. *Journal of Maharashtra Agricultural Universities* 18(1):93-101.
- Roos W, Luckner M (1984). Relationships between proton extrusion and fluxes of ammonium ions and organic acids in *Penicillium cyclopium*. *Journal of General Microbiology* 130:1007-1014.
- Rouat JW, Katznelson H (1961). A study of the bacteria on the root surface and in the rhizosphere soil of crop plants. *Journal of Applied Bacteriology* 24:164-171.
- Rovira AD (1963). Microbial inoculation of plants. I. Establishment of free-living nitrogen fixing bacteria in the rhizosphere and their effects on maize, tomato, and wheat. *Plant and Soil* 19:304-314.
- Salih HM, Yahya AI, Abdul-Rahem AM, Munam BH (1989). Availability of phosphorus in a calcareous soil treated with rock phosphate or superphosphate as affected by phosphate-dissolving fungi. *Plant and Soil* 120:181-185.
- Sánchez P, Logan T (1992). Myths and Science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: Lal R, Sanchez P (eds) *Myths and science of soils of the tropics*. Madison, Soil Science Society of America, 35-46 pp.
- Scher FM (1986). Biological control of Fusarium wilts by *Pseudomonas putida* and its enhancement by EDDA. In: Swinburne T (ed.) *Iron, siderophores, and plant diseases*. Plenum, New York, 109-117 pp.
- Shabayey VP, Smolin VY, Mudrick (1996). Nitrogen fixation and CO<sub>2</sub> exchange in soybeans inoculated with mixed cultures of different microorganisms. *Biology and Fertility of Soils* 24:425-430.
- Smith SE, Read DJ (1997). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London.
- Sreenivasa M, Krishnaraj M (1992). Synergistic interaction between VA mycorrhizal fungi and a phosphate solubilizing bacterium in chili. *Zentralblatt für mikrobiologie* 147:126-130.
- Stevenson FJ (1986). *Cycles of soil*. John Wiley and Sons, New York.
- Sturtz AV, Christie BR, Matheson BG, Nowak J (1997). Biodiversity of endophytic bacteria which colonize red clover nodules, roots, stems and foliage and their influence on host growth. *Biology and Fertility of Soils* 25:13-19.
- Sylvia D (1999). Mycorrhizal symbioses. In: Sylvia D, Fuhrmann J, Hartel P, Zuberer D (eds) *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 408-426 pp.

- Tinker PB (1980). Role of rhizosphere microorganisms in phosphorus uptake by plants. In: Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath EJ (eds) The role of phosphorus in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, 617-654 pp.
- Toro M, Azcon R, Herrera R (1996). Effects on yield and nutrition of mycorrhizal and nodulated *Pueraria phaseolides* exerted by P-solubilizing rhizobacteria. *Biology and Fertility of Soils* 21:23-29.
- Torsvik V, Salte K, Sorheim R, Goksoyr J (1990). Comparison of phenotypic diversity and DNA heterogeneity in a population of soil bacteria. *Appl. Environ. Microbiol* 56:776-781.
- Turco RF (1994). Microbial indicators of soil quality. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA (eds) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA and ASA, Madison, 73-90 pp.
- Van Peer R, Van Kiuik AJ, Rattin KH, Schippers B (1990). Control of Fusarium wilt in carnation grown on rockwool by *Pseudomonas* sp. strain WCS417a and by Fe-EDDA. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 96:119-132.
- Whipps JM, Lynch JM (1986). The influence of the rhizosphere on crop productivity. *Advances in Microbial Ecology* 9:187-244.
- Whitelaw MA (2000). Growth Promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Advances in Agronomy* 69:99-151.
- Yeates G, Darrah PR (1991). Microbial changes in a model rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry* 23:963-971.
- Young CC, Chen CL, Chao CC (1990). Effect of Rhizobium, vesicular-arbuscular mycorrhiza and phosphate solubilizing bacteria on yield and mineral phosphorus uptake of crops in subtropical-tropical. *Transactions 14th international congress of soil science*.
- Young R, Davies C (1980). Phosphate fertilizers and process technology. In: Khasawneh FE, Sample E, Kamprath E (eds) The role of phosphorus in agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI, 195-226 pp.
- Zuberer DA (1999). Biological dinitrogen fixation: introduction and non-symbioti., In: Sylvia D, Fuhrmann J, Hartel P, Zuberer D (eds) Principles and Applications of Soil Microbiology. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 295- 321 pp.



# La materia orgánica en agroecosistemas cafeteros de Colombia

Siavosh Sadeghian Khalajabadi  
Investigador Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé

Cómo citar:

Sadeghian, S. (2009). La materia orgánica en agroecosistemas cafeteros de Colombia. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 72–99). Cenicafé. [https://doi.org/10.38141/10791/0003\\_4](https://doi.org/10.38141/10791/0003_4)

## INTRODUCCIÓN

Dada la importancia que tiene la materia orgánica en los agroecosistemas cafeteros de Colombia, en Cenicafé se ha desarrollado un número considerable de estudios para determinar su influencia sobre el crecimiento y la producción del café en las diferentes regiones del país. Éstos incluyen, por una parte, la acción de la materia orgánica estable del suelo (MO) o el humus, y por otra, el efecto de los diferentes abonos orgánicos que se aplican solos o en combinación con los fertilizantes químicos y enmiendas.

En cuanto a la MO se refiere, los suelos de la región cafetera colombiana difieren en su contenido, pues los factores que gobiernan la formación de los suelos presentan variaciones notables entre un sitio y otro. Adicionalmente, los sistemas en los cuales son mayores los aportes de materiales orgánicos, por ejemplo, los bosques, los guaduales y los cafetales tradicionales bajo sombrío de guamo, tienden a presentar contenidos más altos de MO, lo cual afecta a su vez otras propiedades físicas, químicas y biológicas del medio edáfico donde crecen las raíces de las plantas cultivadas, incluyendo el café.

Con respecto a los abonos orgánicos, las investigaciones desarrolladas por Cenicafé han demostrado que mediante su uso es posible obtener resultados similares o mejores que con los fertilizantes químicos, siempre y cuando las cantidades que se apliquen sean las adecuadas. En este sentido, revisten importancia las altas dosis requeridas, la disponibilidad del abono, y por ende, los mayores costos en los que se incurren, tanto por el producto como los relacionados con su aplicación.

En este documento se hace una revisión breve de los estudios más relevantes sobre el tema. Inicialmente, se presentan de manera general aspectos relacionados con la MO en la zona cafetera del país y su relación con las características del suelo; posteriormente, se muestra información básica acerca de las fuentes orgánicas empleadas como fertilizantes



y, por último, se hace un resumen de los resultados de algunas investigaciones sobre la nutrición orgánica del café en las diferentes etapas del cultivo.

## LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO

En la región cafetera del país existe una gran diversidad de suelos, los cuales contrastan en sus contenidos de materia orgánica (MO), es decir el humus propiamente dicho. Los suelos derivados de cenizas volcánicas, con una representación cercana al 40% del área total, por lo general se caracterizan por presentar altos niveles de MO frente a los suelos originados de otros materiales parentales (Tabla 1).

El contenido de la MO, al igual que las demás propiedades del suelo, presenta una alta variabilidad aun a cortas distancias, como resultado de la acción e interacción de sus factores de formación (material parental, relieve, clima, organismos y tiempo). Lo anterior fue corroborado por Ochoa (2003) y Patiño (2004), quienes midieron dicha variabilidad en seis lotes de café en producción, mediante muestreos sistemáticos que se realizaron cada 10 ó 20 m (Tabla 2). Adicionalmente, cabe resaltar que los contenidos de la MO se reducen con la profundidad (Figura 1), comportamiento que se corroboró en la investigación realizada por Salamanca y Sadeghian (2005).

**Tabla 1.** Contenido de materia orgánica (MO) en los primeros 20 cm, en algunas unidades de suelo de la zona cafetera de Colombia.

Unidad de suelo	Material parental	Clase taxonómica	Rango de MO (%)	Departamento	Municipio
Chinchiná	Ceniza volcánica	Melanudands	8,7-14,3	Caldas	Chinchiná
Chinchiná	Ceniza volcánica	Melanudands	16,2-24,8	Antioquia	Venecia
Doscientos	Basalto	Dystropept	6,4-9,9	Valle del Cauca	Jamundí
Guadalupe	Arenisca	Dystropept	7,7-16,4	Huila	Pitalito
Montenegro	Ceniza volcánica	Fulvudands	4,1-9,4	Quindío	Buenavista
San Simón	Granito biotítico	Europept	3,2-7,9	Tolima	Ibagué
Suroeste	Aglomerados	Dystropept	13,9-19,4	Antioquia	Fredonia
Timbío	Ceniza volcánica	Melanudands	16,1-25,9	Cauca	El Tambo
Salgar	Pizarra	Dystropept	6,9-12,8	Antioquía	Fredonia
Piendamó	Ceniza volcánica	Melanudands	18,2-29,9	Cauca	Piendamó
Fresno	Ceniza volcánica	Fulvudands	12,2-14,5	Tolima	Fresno
Guadalupe	Arenisca	Dystropept	9,4-17,3	Huila	Pitalito

Información tomada de investigaciones desarrolladas en la Disciplina de Suelos de Cenicafé.

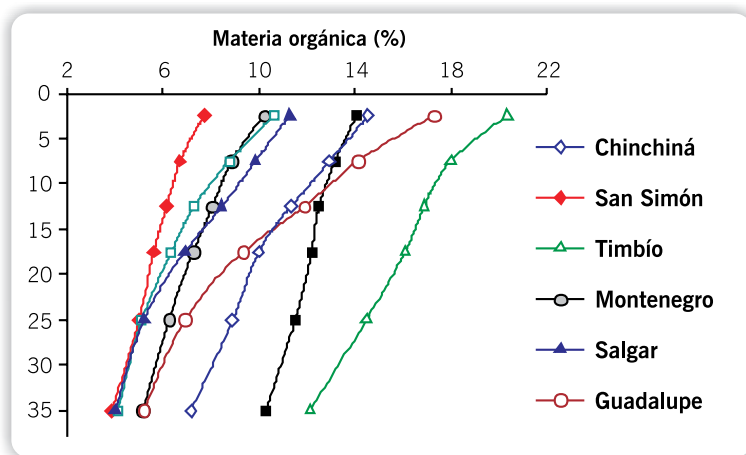
Son diversas las causas que generan dicha variabilidad, siendo la erosión y el aporte de materiales orgánicos las más importantes. En Cenicafé, se ha demostrado que las menores pérdidas del suelo en los cafetales se presentan en cultivos bajo sombra, principalmente por el efecto de la hojarasca (mulch), la cual actúa como un colchón que amortigua el impacto de las gotas de lluvia y reduce la escorrentía. Además, los residuos orgánicos incrementan la MO estable del suelo, con efectos benéficos sobre la infiltración, la retención de la humedad y la agregación de las partículas (Gómez, 1972).

Lo anterior coincide con los reportes de Salamanca y Sadeghian (2005) y Cardona y Sadeghian (2005), quienes evaluaron los contenidos de la MO y su relación con otras propiedades del suelo en algunos agroecosistemas de la zona cafetera. De acuerdo con los resultados obtenidos por estos autores, en los bosques y los guaduales, así como en los cafetales con sombrío de guamo (*Inga spp.*), donde son mayores los aportes de residuos orgánicos, se incrementa la MO en los primeros 10 cm de profundidad (Figura

**Tabla 2.** Valores mínimos, máximos y promedios, de la materia orgánica (MO) en seis lotes de café.

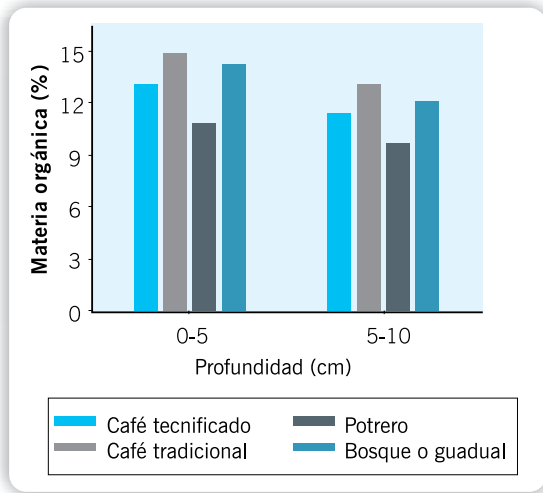
Sitio	Municipio	Departamento	Área del lote (ha)	Contenido la materia orgánica (%)			C.V. (%)
				Mínimo	Máximo	Promedio	
E.C. Naranjal*	Chinchiná	Caldas	1,0	10,80	16,80	14,26	7,9
S.E. Paraguaicito*	Buenavista	Quindío	1,0	5,20	9,80	7,10	14,8
S.E. Maracay*	Quimbaya	Quindío	1,0	6,60	14,70	10,26	14,1
S.E. La Catalina*	Pereira	Risaralda	1,0	5,60	14,00	10,22	11,1
Finca La Morada**	Sevilla	Valle del Cauca	2,8	3,00	11,90	5,84	25,10
Finca Las Delicias**	Trujillo	Valle del Cauca	2,7	7,20	17,60	12,57	20,82

E.C.: Estación Central, S.E.: Subestación, \*: Datos de Ochoa *et al.* (2003), \*\*: Datos de Patiño (2004)



**Figura 1.** Variaciones de los contenidos de la materia orgánica (MO) con la profundidad, en ocho unidades de suelos de la zona cafetera.

Tomado de Salamanca y Sadeghian (2005).



**Figura 2.** Contenido de la MO en cuatro agroecosistemas de la zona cafetera de Colombia (promedio de ocho unidades de suelo).

Tomado de Salamanca y Sadeghian (2005).

2), lo cual trae beneficios en el suelo como la disminución de la densidad aparente, la densidad real y la resistencia a la penetración, en tanto que aumenta la porosidad total, la estabilidad de agregados, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la disponibilidad del nitrógeno nítrico.

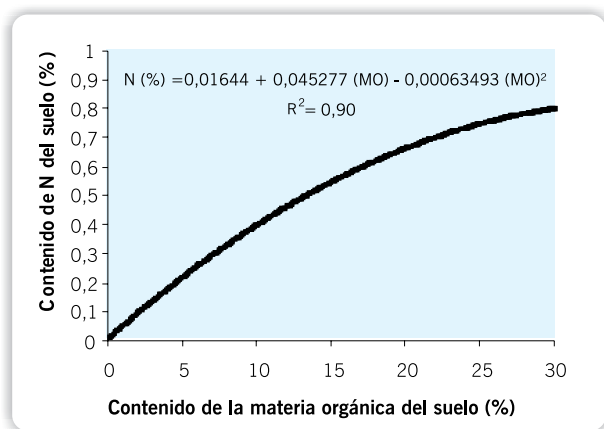
Salamanca y Sadeghian (2004) sostienen que una vez establecido el cafetal, el manejo del suelo debe orientarse a conservar o mejorar sus condiciones físicas y a protegerlo de la erosión. Algunas prácticas como el manejo integrado de arvenses y la adición de residuos orgánicos, por ejemplo, pulpa descompuesta, ramas de café después del zoqueo y hojarasca, entre otros, contribuyen a reducir la compactación, mantener la humedad, mejorar la agregación y aumentar la porosidad del suelo, y a favorecer el desarrollo de las raíces del cultivo.

A través del proceso de la mineralización, la MO llega a aportar considerables cantidades de nutrientes a las plantas, principalmente nitrógeno (N). Para la zona cafetera de Colombia se han obtenido varios modelos matemáticos, con el fin de estimar el contenido total del N en función de la MO del suelo (Carrillo y Chavez, 1994; Sadeghian, 2003). Estas expresiones, en su mayoría de tipo cuadrático, sugieren un incremento de este elemento hasta niveles cercanos a 30-35% de la MO; valor después del cual se presenta un descenso del N, como consecuencia en la reducción de la actividad microbiana. Con respecto a lo anterior, el modelo más divulgado se obtuvo al analizar 1.174 parejas de datos con valores de N mayores de 0,05% y para MO mayores de 2,0% (Figura 3).

## LOS FERTILIZANTES ORGÁNICOS

La principal fuente de materia orgánica<sup>1</sup> en las fincas cafeteras es la pulpa fresca de café, ya que en el proceso de la obtención de 1.250 kg de café pergamino seco (c.p.s.)

<sup>1</sup>Se refiere a los materiales orgánicos comúnmente empleados como fertilizantes (abonos). Para referirse a la materia orgánica del suelo o humus propiamente dicho, en el texto se utiliza la sigla MO.



**Figura 3.** Contenido de N en función de la MO, en suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Carrillo y Chávez (1994).

(equivalentes a 100 arrobas), se generan cerca de 2.700 kg de este material orgánico. La composición elemental de la pulpa presenta algunas variaciones, de acuerdo a la localidad y el manejo de la plantación. Al respecto, Sadeghian (2006) encontraron los siguientes valores promedios para cinco muestras analizadas de pulpa fresca: N 1,71%, P 0,10%, K 3,30%, Ca 0,26%, Mg 0,08%, S 0,02%, Fe 42,98 mg.kg<sup>-1</sup>, Mn 24,30 mg.kg<sup>-1</sup>, Zn 6,58 mg.kg<sup>-1</sup>, Cu 24,10 mg.kg<sup>-1</sup> y B 51,87.mg kg<sup>-1</sup>. Según estos valores y teniendo en cuenta que el 47% de los elementos extraídos por los frutos de café en la cosecha se encuentran en la pulpa, se puede afirmar que la pulpa generada en el proceso de la producción de 100 arrobas de c.p.s. contiene 10,2 kg de N, 1,4 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 23,8 kg de K<sub>2</sub>O, 2,2 kg de CaO, 0,8 kg de MgO y 0,4 kg de SO<sub>4</sub> (Sadeghian ., 2007).

Hace más de cinco décadas, Uribe (1956) sostenía que los cafeteros de Colombia botaban anualmente “7 millones de pesos”, al no emplear como fertilizante la pulpa que se generaba en ese entonces (860.000 t). Hoy, al hacer los mismos cálculos, podemos afirmar que en el país se generan cerca de 4.500.000 t de pulpa al año, las cuales pueden llegar a aportar las siguientes cantidades de nutrientes: 7.366 t de N, 1.022 t de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 17.165 t de K<sub>2</sub>O. Si las anteriores cifras se expresan en términos de los fertilizantes comerciales Urea, Fosfato diamónico (DAP) y Cloruro de potasio (KCl), su costo estaría cercano a los 80 mil millones de pesos (\$ 80.000.000.000).

Es factible descomponer la pulpa fresca a través de volteos permanentes o mediante el empleo de la lombriz roja californiana. En el proceso de la descomposición de la pulpa por la lombriz roja californiana, la masa inicial del material se reduce a una tercera parte (Dávila y Ramírez, 1996), y ocurren cambios químicos importantes que determinan la calidad del abono resultante, entre los que se pueden resaltar: incremento del pH y los contenidos de proteína, fibra y elementos mayores y menores, y reducción de las grasas, el carbono orgánico, los carbohidratos solubles y la relación C/N (Blandón *et al.*, 1999).

Otros abonos orgánicos de importancia, según las actividades agropecuarias que se desarrollan en cada región y finca, son: la gallinaza, la pollinaza, la porquinaza, la bovinaza, la cenichaza, etc. (Tabla 3). Las propiedades químicas de los anteriores abonos también pueden presentar diferencias frente a los reportados en la literatura, lo cual se

**Tabla 3.** Propiedades de algunos abonos orgánicos analizados en el laboratorio de la Disciplina de Suelos de Cenicafé.

Abono orgánico	No. muestras analizadas	pH	N	P	K	Ca	Mg	Cenizas	Humedad
----- (%) -----									
Pulpa descompuesta	8	5,9	2,99	0,19	2,52	1,74	0,40	19	58
Lombrinaza	17	6,6	2,62	0,41	2,08	1,81	0,40	43	61
Gallinaza	10	8,4	1,49	1,81	2,21	12,28	0,88	45	18
Pollinaza	2	8,7	2,07	2,20	3,03	5,80	0,91	37	39
Bovinaza	3	8,0	1,53	0,69	1,96	1,93	0,81	53	39
Porquinaza	1	SD	2,21	1,65	1,15	5,40	1,00	30	SD
Bocashi	1	7,9	1,31	1,04	0,97	4,02	0,79	64	41

SD: Sin dato

relaciona con las variaciones en las condiciones agroclimáticas predominantes de la zona en donde se obtienen las materias primas (principalmente, clima y suelo), el manejo de las plantaciones y de los animales, y el proceso de la descomposición o del compostaje.

Otras fuentes importantes las constituyen los materiales orgánicos que resultan de los aportes de árboles de sombrío o de abonos verdes, que se pueden establecer en asocio con el café durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo. Entre las especies más comunes, empleadas en Colombia como sombrío permanente, están los guamos (*Inga* spp.). De acuerdo a los resultados de la investigación realizada por Cardona y Sadeghian (2005), en los municipios de Chinchiná (Caldas) y El Cairo (Valle del Cauca), la cantidad del material orgánico que el sistema café y guamo llega a aportar (cerca de 11 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) es más del doble que el del monocultivo de café (menor a 4,5 t.ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), con aportes importantes de nutrientes (Tabla 4).

Los abonos verdes, en especial los que provienen de las leguminosas, pueden ser importantes fuentes de nutrientes, principalmente de N. Para condiciones de la Estación Central Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), Jiménez *et al.* (2005) evaluaron la producción de biomasa y el aporte de nutrientes de guandul (*Cajanus cajan*), crotalaria (*Crotalaria juncea*) y tephrosia (*Tephrosia candida*), establecidas en tres densidades. Dada la alta cantidad de nutrientes que aportan estas especies (Tabla 5), los autores recomiendan tenerlas en cuenta para ser empleadas dentro de los programas de fertilización orgánica de los cafetales.

Entre las especies forestales que se establecen en asocio con café en algunas regiones de Colombia, se encuentran el nogal (*Cordia alliodora*), el pino (*Pinus oocarpa*) y el eucalipto (*Eucalyptus grandis*), las cuales llegan a aportar cantidades importantes de residuos orgánicos y nutrientes, a través del ciclaje. Farfán y Urrego (2007) midieron la producción de biomasa y la transferencia de nutrientes de estas especies en la Subestación Paraguaicito (municipio de Buenavista, Quindío). La materia seca generada durante dos años por el café a libre exposición solar fue de 4,9 t.ha<sup>-1</sup>, y en asocio con nogal, pino y eucalipto fue de 3,8, 4,6 y 4,1 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente; así mismo, se reportan los siguientes valores

**Tabla 4.** Estimación de los aportes anuales de nutrientes (kg.ha<sup>-1</sup>) del material orgánico, en dos localidades de la zona cafetera.

Nutriente	Chinchiná		El Cairo*	
	Café y guamo	Café	Café y guamo	Café
N	199,24	92,17	219,37	98,26
P	7,73	4,7	13,75	8,58
K	48,87	36,3	55,53	55,15
Ca	158,05	54,61	187,05	77,71
Mg	27,31	5,98	30,66	14,59
Fe	1,27	1,18	1,24	0,71
Mn	0,99	0,94	2,34	1,16
Zn	0,21	0,04	0,19	0,07
Cu	0,15	0,06	0,17	0,14
B	0,21	0,2	0,22	0,27

Tomado de Cardona y Sadeghian (2005). \*En el texto original se hace referencia al corregimiento de Albán (El Cairo, Valle del Cauca).

**Tabla 5.** Aportes de biomasa (en base seca) y nutrientes transferidos por tres especies leguminosas, durante 180 días. Promedio obtenido de tres densidades de siembra (60.000, 86.000 y 172.000 plantas/ha).

Especie	Biomasa (t.ha <sup>-1</sup> )	Nutrientes (kg.ha <sup>-1</sup> )				
		N	P	K	Ca	Mg
<i>C. cajan</i>	7,64	136,8	16,9	127,3	25,0	7,2
<i>C. juncea</i>	4,17	128,2	14,3	96,2	23,8	8,8
<i>T. candida</i>	5,43	153,7	14,8	105,4	18,9	8,9

Tomado de Jiménez *et al.* (2005).

promedio para la biomasa aportada por las tres especies forestales: nogal 3,5 t.ha<sup>-1</sup>, pino 6,7 t.ha<sup>-1</sup> y eucalipto 6,4 t.ha<sup>-1</sup>. En la Tabla 6 se observa la tasa de descomposición mensual del follaje, la concentración inicial de nutrientes en las hojas y el porcentaje de nutrientes transferidos durante un año, por cada una de las especies objeto de estudio.

**Tabla 6.** Tasa de descomposición de la hojarasca ( $k$ ), concentración inicial de nutrientes en las hojas y porcentaje de nutrientes transferidos al suelo durante un año por café y tres especies forestales en asocio con café en la Subestación Paraguaicito.

	Café al sol	Nogal	Pino	Eucalipto
<b>Tasa de descomposición mensual del follaje</b>	-----( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) -----			
	1,00	0,78	0,26	0,72
<b>Concentración inicial de nutrientes</b>	----- (%) -----			
N	2,81	1,44	0,48	0,78
P	0,19	0,07	0,02	0,05
K	1,23	0,80	0,18	0,59
Ca	1,7	5,50	0,45	1,07
Mg	0,33	0,80	0,06	0,14
<b>Transferencia de nutrientes en un año</b>	----- (%) -----			
N	64,8	33,3	23,6	0
P	82,9	54,4	35,5	0
K	96,7	93,6	89,3	64,5
Ca	34,3	54,0	28,5	0
Mg	63,1	67,4	39,9	0

Densidad de siembra: café 4.444 plantas/ha, especies forestales 278 plantas/ha.  
Tomado de Farfán y Urrego (2007).

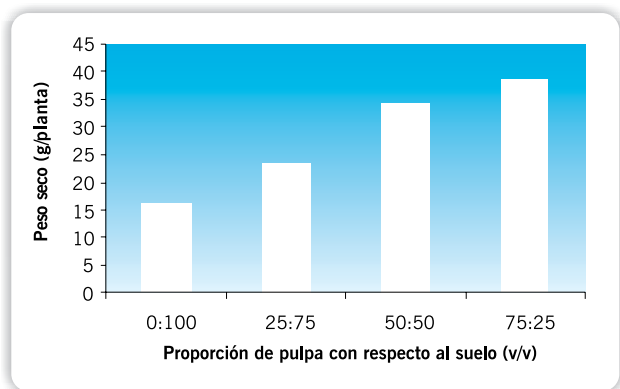
## LA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA DE LOS CAFETALES

### Etapa de almácigo

#### Pulpa de café descompuesta

Mestre (1973) llevó a cabo una investigación para determinar la respuesta de café a la pulpa descompuesta en la fase de almácigo. Los tratamientos consistieron en las siguientes cuatro proporciones de la mezcla de pulpa:suelo: 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 (v/v). Al incrementar la proporción de la pulpa con relación al suelo, el promedio del peso seco y la altura las plantas se incrementó (Figura 4); sin embargo, el autor considera que la mejor proporción es la de 50:50, pues con la adición de mayores cantidades de pulpa (75:25) sólo se presenta un crecimiento muy leve.

En un experimento que se desarrolló tanto en invernadero como en el campo, Valencia (1972) determinó el efecto de la pulpa de café descompuesta (una parte de pulpa por tres partes de suelo), sobre el vigor de las plantas de café, seis meses después del transplante de la plántula (chapola). Los resultados obtenidos demostraron las bondades de la pulpa descompuesta en la preparación del sustrato tanto en el almácigo (obtenido en el



**Figura 4.** Efecto de la pulpa de café descompuesta en el peso total de la materia seca de café en la etapa de almácigo. Tomado de Mestre (1973).

invernadero) como en el hoyo de la siembra (campo), al encontrar que el peso fresco y la altura de las plantas en el tratamiento con pulpa, eran estadísticamente mayores a los presentados en las plantas del tratamiento de suelo solo (Tabla 7).

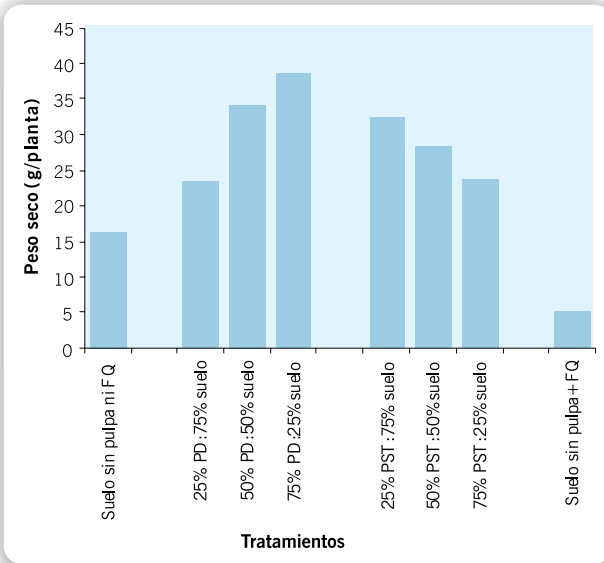
En un experimento conducido por Mestre (1977), se valoró el efecto de i) la pulpa de café descompuesta, ii) la pulpa seca triturada en un molino de martillo, y iii) la fertilización química, en almácigos a plena exposición solar, mediante ocho tratamientos. La aplicación del fertilizante químico afectó negativamente el crecimiento de las plantas; presentando así el menor promedio de todos los tratamientos (Figura 5); el peso seco total de las plantas se incrementó conforme a las cantidades empleadas de pulpa descompuesta y sin triturar, mientras que con la pulpa seca triturada el mayor incremento se obtuvo al emplear la dosis más baja, comportamiento que se relacionó con la descomposición incompleta de esta clase de pulpa. Por lo anterior, se recomienda hacer la mezcla de suelo y pulpa seca triturada, por lo menos un mes antes de sembrar las plantas.

Uno de los primeros trabajos en torno al uso de la materia orgánica en almácigos de café fue desarrollado por Parra (1959), quien determinó el “valor” de la pulpa, al aplicarla sola y en mezcla con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), para un suelo del departamento de Caldas, ubicado en la Estación Central Naranjal, y clasificado como “Serie 10” (hoy día Unidad Chinchiná). La pulpa de café descompuesta y el P ocasionaron aumentos significativos en el peso de las plantas, siendo mayor el efecto de la pulpa (Figura 6); esta semejanza llevó a presumir que la pulpa actuaba en gran medida, como un material de naturaleza fosfórica. El N tuvo un efecto negativo, mientras que el uso de K apenas

**Tabla 7.** Respuesta de café en invernaderos y en el campo, a la adición de pulpa descompuesta, seis meses después de la siembra de la plántula.

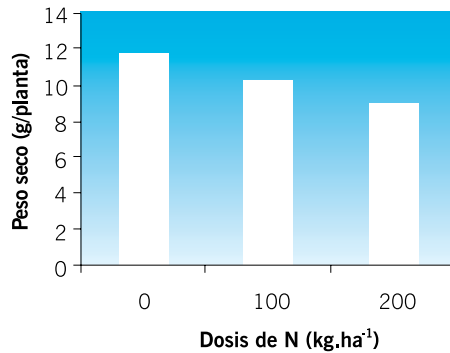
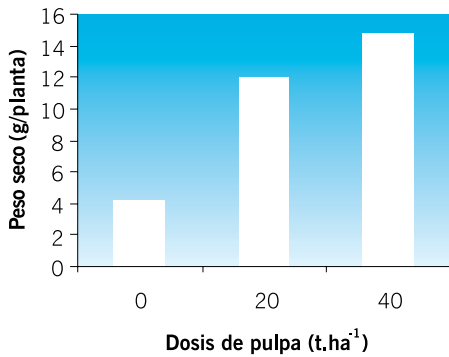
	Invernadero		Campo	
	Con pulpa	Sin pulpa	Con pulpa	Sin pulpa
Peso fresco (g)	207,9	87,9	214,2	130,3
Longitud del tallo (cm)	36,7	23,6	34,9	27,9



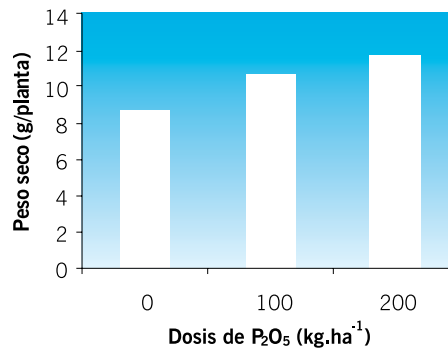


**Figura 5.** Efecto de la pulpa de café descompuesta, la pulpa seca triturada y la fertilización química sobre el peso total de la materia seca de café en almácigos a plena exposición solar.

FQ: Fertilizante Químico 12-12-17-2 aplicado a los 15 días de transplante y a los tres meses, PD: Pulpa descompuesta, PST: Pulpa Seca Triturada  
Tomado de Mestre (1977).



**Figura 6.** Respuesta del café a la pulpa descompuesta, N y P (peso seco de las plantas 210 días después de aplicados los tratamientos).  
Tomado de Parra (1959).

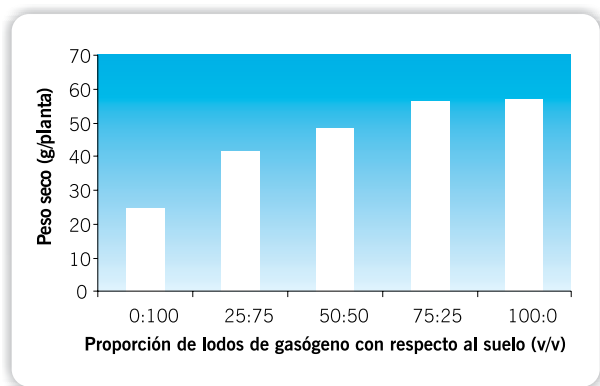


modificó el crecimiento de las plantas, efecto que solamente se manifestó en el peso seco de la parte aérea. El contenido de la MO del suelo, las bases intercambiables, la CIC y el pH se incrementaron como consecuencia de la aplicación de la pulpa.

Es frecuente que los caficultores apliquen fertilizantes foliares en los almácigos con el fin de obtener plantas más vigorosas. Guzmán y Riaño (1996) y Valencia (1965), evaluaron para esta fase, la respuesta de café a diferentes productos disponibles en el mercado, los cuales fueron suministrados a las plantas, en dos niveles de materia orgánica (con y sin pulpa descompuesta). En los dos trabajos, la aplicación del abono orgánico se tradujo en un mayor peso de las plantas; en contraste, no se presentaron diferencias estadísticas al comparar los tratamientos a base de fertilizantes foliares en cada nivel de materia orgánica.

Al utilizar la pulpa de café para la producción de biogás o gas combustible, mediante la digestión anaeróbica, el material de desecho que resulta del gasógeno puede ser empleado como abono orgánico, razón que condujo a Bedoya y Salazar (1985) a evaluar su potencial para almácigos de café en diferentes proporciones de mezcla con el suelo. Con base en los resultados obtenidos (Figura 7), los autores sugieren como la proporción más adecuada, utilizar 1/4 parte de este material, en mezcla con 3/4 partes de suelo (v/v).

Cuando las plantas reciben una adecuada nutrición son más vigorosas; comportamiento que se refleja no solo en su biomasa o producción, sino en la tolerancia que exhiben ante las condiciones adversas, por ejemplo estrés por sequía y daño por plagas y enfermedades. En esta etapa, uno de los problemas más frecuentes es la mancha de hierro (Berk y Cooke), hongo que ataca las hojas de café, causando su caída y el debilitamiento de la planta. Cadena (1982) determinó la incidencia de esta enfermedad a través de una investigación en la que se evaluaron tratamientos a base de materia orgánica (mezcla de pulpa:suelo en proporción 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0 v/v), en combinación con el control químico (con y sin aplicación de fungicida Captafol). Al emplear pulpa de café descompuesta no hubo diferencias significativas entre los tratamientos con y sin el control químico de la mancha de hierro. En contraposición, cuando las plantas crecieron en suelo solo sí hubo respuesta a la aplicación del fungicida. El mayor peso seco de la parte aérea se obtuvo mediante la mezcla en proporción 25:75.



**Figura 7.** Efecto de los lodos de la digestión anaeróbica de la pulpa de café sobre el peso seco de las plantas de café en la etapa de almácigo.

Tomado de Bedoya y Salazar (1985).

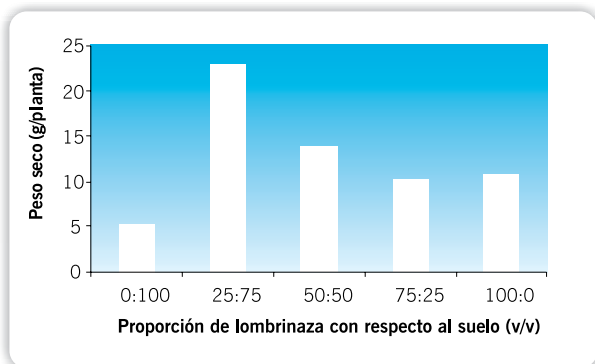
## Lombrinaza de pulpa de café

La investigación desarrollada por Arango y Dávila (1991) dio a conocer la posibilidad de acelerar la descomposición de la pulpa de café mediante el uso de la lombriz roja californiana (Sav.); de allí el auge que ha tomado este proceso en los últimos años en las diversas regiones cafeteras de Colombia, y los estudios en torno a su uso.

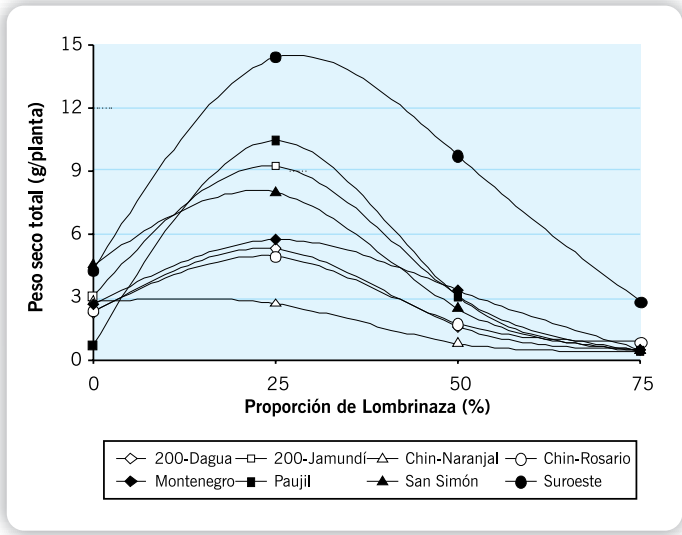
Salazar (1992) estudió el efecto de la lombrinaza de pulpa de café sobre el vigor de las plantas de café en la etapa de almácigo, aplicando las siguientes proporciones de mezcla lombrinaza:suelo (v/v): 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0. Al emplear la proporción de 25% de lombrinaza más 75% de suelo, el peso seco de las plantas (parte aérea y raíces), fue mayor que los otros tratamientos (Figura 8).

En La Granja de Cenicafé, y bajo las mismas condiciones ambientales, Salamanca y Sadeghian (2008) evaluaron el efecto de diferentes relaciones de mezcla de lombrinaza de pulpa de café y suelo, en el vigor de las plantas, para ocho unidades cartográficas de suelo de la región cafetera, contrastantes en su contenido de MO. En todas las unidades, a excepción de Chinchiná en Naranjal, la proporción más adecuada fue 1:3 (v/v), es decir, 25% de lombrinaza y 75% de suelo (Figura 9). Mediante esta relación de mezcla se logró aumentar el peso seco total de las plantas (raíz y parte aérea) entre 180% y 1.500% con respecto a las plantas que crecieron en suelo sin lombrinaza, independiente de los contenidos de MO. Las anteriores diferencias entre las unidades del suelo estuvieron asociadas con los cambios en algunas propiedades del suelo como el pH del sustrato. Las proporciones del 50% y del 75% de lombrinaza afectaron negativamente el crecimiento de las plantas en todos los suelos.

Para cinco suelos de la zona cafetera (cuatro Subestaciones de Cenicafé y una finca del municipio de Jamundí, en el Valle del Cauca), Díaz (2006) determinó el efecto combinado de la lombrinaza y el fósforo, aplicado en forma de DAP, sobre el peso seco total de las plantas de café. En los suelos de todas las localidades, a excepción de Santander sin adición de lombrinaza, hubo incremento en el peso de las plantas cuando se aplicó DAP (Figura 10). En los suelos de Jamundí, El Rosario y Santander, los mayores valores se registraron al combinar la lombrinaza con el DAP.

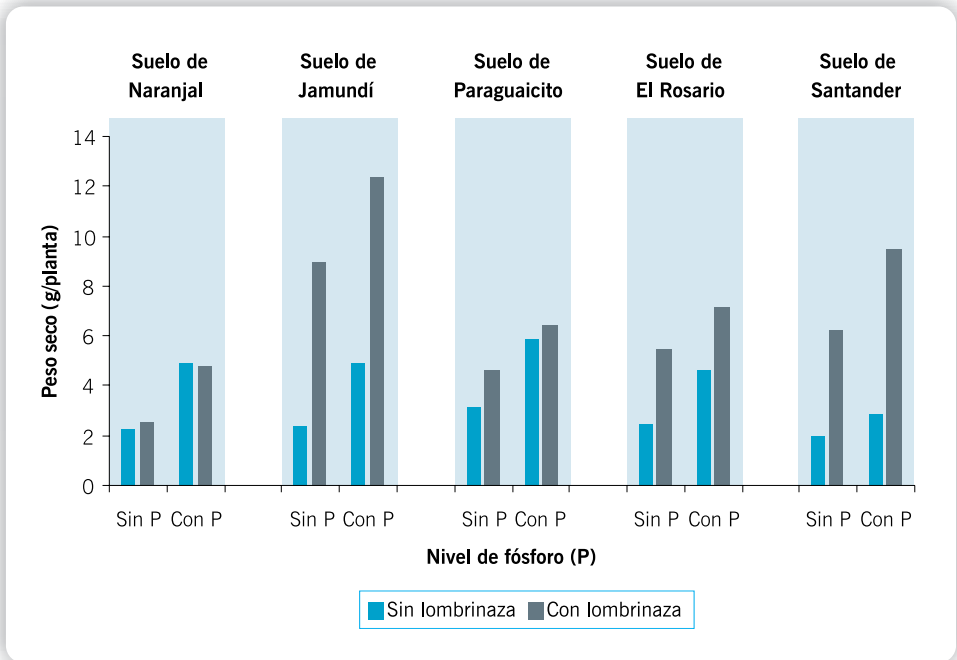


**Figura 8.** Efecto de la lombrinaza de pulpa de café sobre el peso seco de plantas de café en la etapa de almácigo. Tomado de Salazar (1992).



**Figura 9.** Respuesta del café en la etapa de almácigo a cuatro proporciones de mezcla suelo:lombrinaza, en suelos de la zona cafetera.

Contenido de MO de las unidades cartográficas de suelo: 200-Dagua 6,1%, 200-Jamundí 9,9%, Chinchiná-Naranjal 8,3%, Chinchiná-El Rosario 18%, Montenegro 7,9%, Paujil 12,5%, San Simón 4,3% y Suroeste 9,3% Tomado de Salamanca y Sadeghian (2008).



**Figura 10.** Efecto combinado de la lombrinaza y DAP sobre el peso seco total de las plantas de café en cinco suelos de la zona cafetera. Adaptada de Díaz (2006).

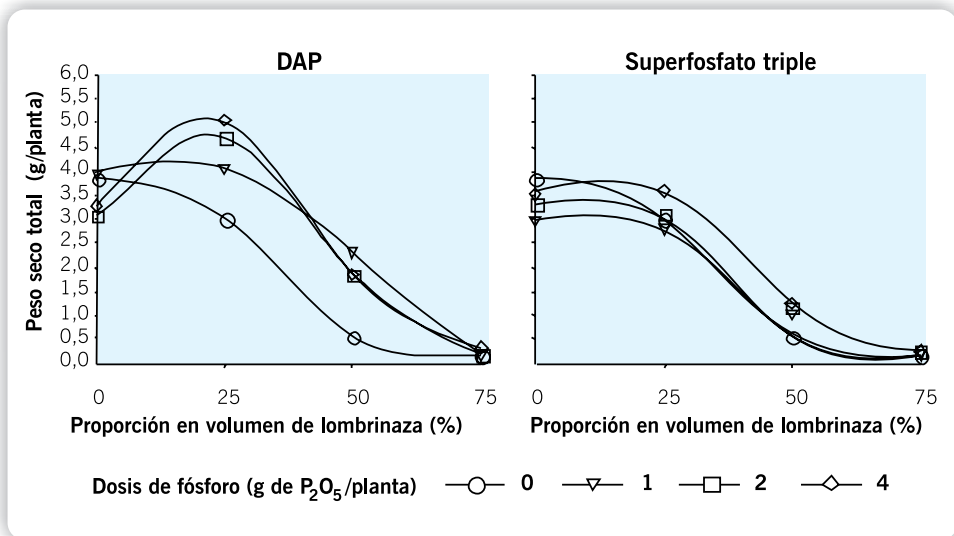
En una investigación desarrollada en el departamento de Santander por Ávila (2007), se demostró que cuando no se empleaban abonos orgánicos, la respuesta a la adición de fósforo estaba sujeta al contenido de este nutriente en el suelo. En este mismo trabajo, se halló que la aplicación de DAP puede contribuir a reducir los efectos nocivos de la lombrinaza cuando está parcialmente descompuesta; en dicho caso, no por el suministro de fósforo sino por la acidez residual que genera esta fuente en el proceso de la nitrificación del amonio, la cual reduce la actividad de las bacterias que realizan la descomposición de la pulpa. Con el Superfosfato triple (SFT) no se generó este efecto (Figura 11).

### Fuentes de materia orgánica de origen avícola (gallinaza y pollinaza)

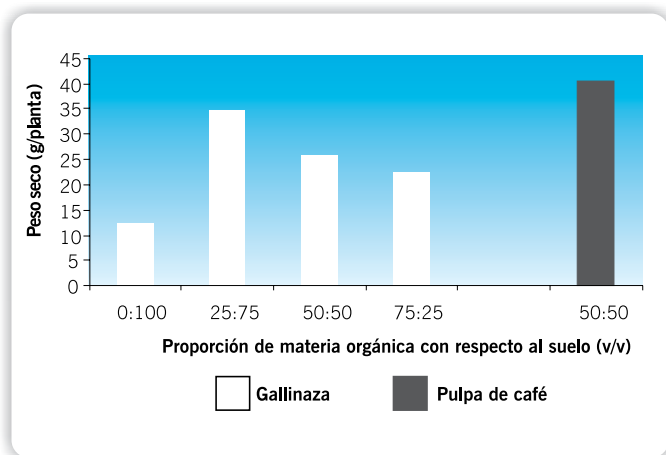
En algunas regiones del país, la industria avícola es un renglón económico importante, no solo por la producción de carne o huevos, sino por que genera grandes volúmenes de materiales orgánicos, que se convierten en una alternativa para abonar diversos cultivos, entre ellos el café.

Los resultados obtenidos por Salazar y Mestre (1990), en torno al uso de la gallinaza en los almácigos de café, sugieren que al mezclar este abono con el suelo en relación 25:75 (v/v), se generan incrementos en el peso seco de las plantas, comparables a los obtenidos con la pulpa de café descompuesta en relación 50:50 (Figura 12).

En el departamento de Santander, Ávila *et al.*, (2007) utilizaron diferentes combinaciones de gallinaza o pollinaza con adición de dosis crecientes de fósforo (0, 2 y 4 g/planta de  $P_2O_5$ ) en forma de DAP o SFT, para medir su efecto en el vigor de las plantas en la etapa de almácigo. La aplicación de los abonos orgánicos influyó en el peso de las plantas; en



**Figura 11.** Respuesta de las plantas de café en la fase de almácigo a la aplicación de DAP y SFT, en combinación con lombrinaza. Tomado de Ávila *et al.* (2007).

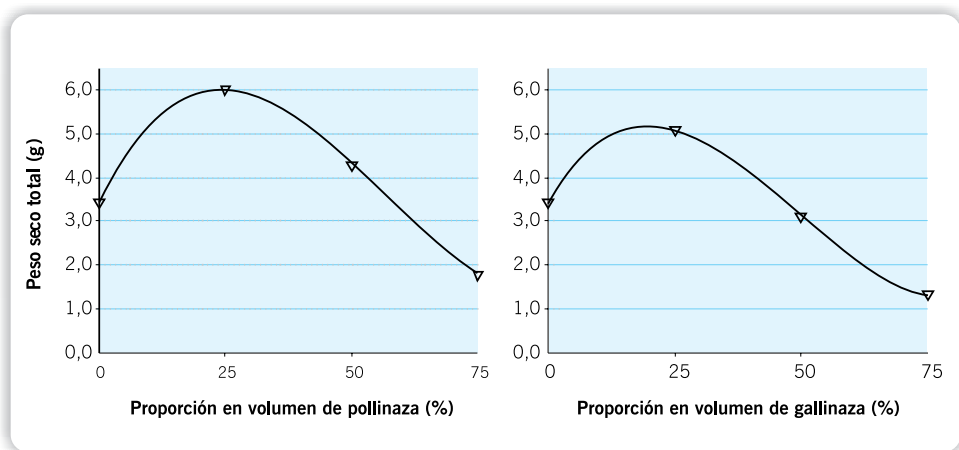


**Figura 12.** Efecto de la gallinaza y pulpa descompuesta de café en el peso total de la materia seca de café, en la etapa de almácigo. Tomado de Salazar y Mestre (1990).

este sentido, los promedios obtenidos se incrementaron con la primera dosis de las dos fuentes en mezcla con el suelo, para luego disminuir con las cantidades más altas (Figura 13). No se halló respuesta al fósforo, cuando se suministró a las plantas que se desarrollaban en suelo sin abono orgánico, resultado que se atribuyó al contenido de este elemento en el suelo ( $14 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Al adicionar el fósforo en combinación con los abonos orgánicos, tampoco hubo efecto.

### Otros abonos orgánicos

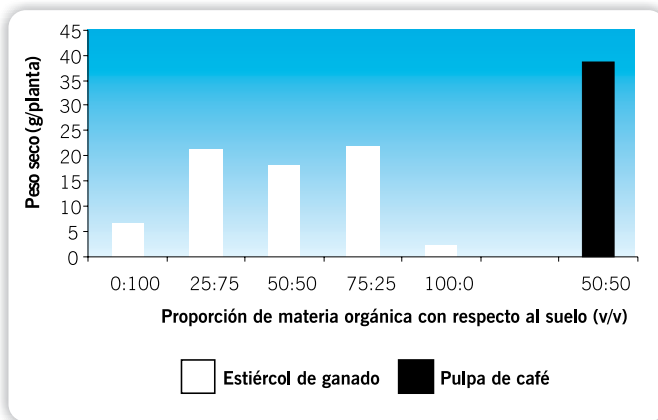
**Estiércol de ganado.** Para las condiciones de Pueblo Bello (departamento de Cesar), Salazar y Montesino (1994) midieron la respuesta de las plantas de café a diferentes



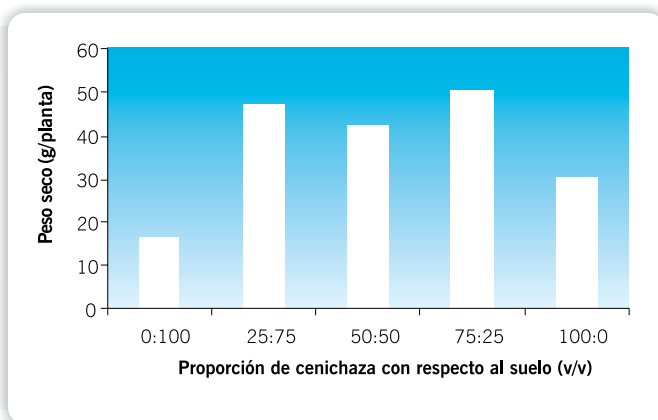
**Figura 13.** Respuesta de café en la etapa de almácigo en función de la proporción de abonos orgánicos de origen avícola en mezcla con suelo. Tomado de Ávila *et al.* (2007).

proporciones de mezcla de estiércol de ganado y suelo (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0); tratamientos que se compararon con la pulpa descompuesta en relación 50:50 (v/v). Con la dosis más baja del estiércol se obtuvo un incremento significativo en el peso de las plantas (Figura 14), tendencia que se conservó con las siguientes dos dosis, razón por la cual los autores sugieren mezclar este abono con el suelo en una relación de 1 a 3. Al emplear la pulpa de café, el peso seco de las plantas fue casi el doble del mejor tratamiento de estiércol.

**Cenichaza.** Uno de los subproductos de los ingenios en el proceso industrial de la producción de azúcar es la cenichaza, la cual consiste en una mezcla no homogénea de ceniza y cachaza. Debido a que la cenichaza puede emplearse como abono orgánico, Salazar y Mestre (1993) evaluaron su efecto en almácigos de café. Con la mezcla de una parte de cenichaza y tres partes de suelo (v/v) se registró un incremento significativo en el peso seco de las plantas con respecto al testigo sin este abono (Figura 15). Adicionalmente, con esta proporción se incurrieron en los menores costos.



**Figura 14.** Efecto del estiércol de ganado y pulpa descompuesta de café en el peso seco total de plantas de café en la etapa de almácigo. Tomado de Salazar y Montesino (1994).



**Figura 15.** Efecto de diferentes proporciones de cenichaza en el peso seco total de plantas de café, en la etapa de almácigo. Tomado de Salazar y Mestre (1993).

## ETAPA DE CRECIMIENTO VEGETATIVO

Los primeros resultados obtenidos en materia de nutrición de cafetales en Colombia fueron presentados por Machado (1952), quien encontró efecto de algunas fuentes orgánicas en la producción de café, en la Subestación Blonay (Norte de Santander), durante el primer año (Tabla 8). Desde un inicio, se vislumbra la importancia de la pulpa de café como insumo indispensable en el establecimiento de los cafetales y su efecto en la productividad.

Para un suelo de la unidad Chinchiná, López (1966) midió el crecimiento de café un año después de haber aplicado 0, 2, 4, 8, 16 y 32 t.ha<sup>-1</sup> de pulpa de café descompuesta, molida y tamizada. Las cantidades mencionadas se aplicaron en dos formas: superficialmente e incorporadas en los primeros 10 cm de profundidad. Para las variables número de hojas, altura de la planta, diámetro del tallo a los 10 cm del suelo y peso seco de la parte aérea, no se registraron diferencias entre los tratamientos con pulpa frente al testigo sin fertilizar. Este comportamiento se relacionó con la fertilidad natural del suelo para soportar los requerimientos nutricionales de la planta durante el primer año. En la Tabla 9 se presentan los promedios de peso seco obtenidos.

**Tabla 8.** Efecto de algunas fuentes orgánicas y azufre en la producción de café variedad Típica, establecido bajo sombra de guamo (*Inga spp.*) en la Subestación Blonay (Norte de Santander). Tomado de Machado (1952).

Tratamientos	Producción de café cereza (g/parcela)
Testigo sin fertilizar	1.541
Pulpa de café descompuesta (9 L/árbol/año)	4.999
Harina de hueso (500 g/árbol/año)	2.735
Harina de hueso + 15% de azufre (500 g/árbol/año)	2.788
Abono de establo (9 L/árbol/año)	2.802

**Tabla 9.** Efecto de la aplicación de pulpa descompuesta sobre el peso seco (g) de plantas de café de un año de edad (los datos corresponden a la suma de dos plantas por parcela). Tomado de López (1966).

Dosis de pulpa (t.ha <sup>-1</sup> )	Sistema de aplicación de pulpa		Promedio
	Superficial	Incorporada	
0	341,2	291,0	316,1
2	310,0	362,6	336,3
4	327,4	294,6	311,0
8	341,4	337,8	339,6
16	334,0	368,6	351,3



Una investigación desarrollada por Uribe y Salazar (1983) demostró que se pueden obtener efectos benéficos en la producción, si se incorporan 6 kg de pulpa de café en el hoyo de la siembra, en suelos con bajos niveles de MO. Esta cantidad puede resultar costosa cuando no se dispone del abono orgánico en la finca, especialmente en plantaciones con medianas y altas densidades de siembra, pues la cantidad requerida resulta muy elevada, así: 24 t para 4.000 plantas/ha, 36 t para 6.000 plantas/ha, 48 t para 8.000 plantas/ha y 60 t para 10.000 plantas/ha.

Con la finalidad de estimar los requerimientos de abono orgánico al momento de la siembra y sus implicaciones prácticas y económicas, en la Tabla 10 se presenta la cantidad por planta y hectárea, de acuerdo con el tamaño del hoyo, la densidad de siembra y la relación de mezcla con el suelo. Al construir hoyos pequeños (25x25x30 cm), la cantidad de abono orgánico por hoyo será de 4.688 cc (4,7 L), si la relación de mezcla con el suelo es de 1:3; ahora bien, al extrapolar este dato para una hectárea, se necesitarán entre 9,4 y 46,9 m<sup>3</sup> según la densidad empleada. En el caso de hacer una mezcla en la proporción de 1:6, se necesitarán 2.679 cm<sup>3</sup> (2,7 L) por hoyo, y entre 5,4 y 26,8 m<sup>3</sup> de abono orgánico.

Sadeghian (2008) recomienda tener en cuenta el nivel de la MO para la recomendación de N en esta etapa de desarrollo del cultivo, dada la alta relación entre los contenidos de estos dos. Para lo anterior se establecen dos categorías: i) Suelos con contenidos bajos a medios (MO ≤ 8%) y, ii) suelos con contenidos medios a altos (MO > 8%). Para la primera se sugiere una dosis más alta (desde 7,0 g/planta de N en el mes 1 ó 2, hasta 16 g/planta de N en el mes 18) que para la segunda (de 5 a 14 g/planta de N) (Tabla 11).

## ETAPA DE PRODUCCIÓN

### Efecto de abonos orgánicos en la producción

Los primeros estudios sobre la nutrición de cafetales en Colombia fueron orientados por Machado (1958), quien determinó el efecto de algunos nutrientes en mezcla con la pulpa descompuesta y otros abonos orgánicos, en la producción de los cafetales jóvenes y viejos al sol y bajo sombra. Los resultados de estas investigaciones permitieron conocer las bondades de la materia orgánica cuando se empleaba en cantidades altas, razón por la cual se sugiere aprovechar toda la pulpa de café, residuos de establo, etc., con el fin de mejorar los suelos más pobres. Además, se enfatiza la conveniencia de conservar un cierto nivel de MO en los cafetales.

En seis Subestaciones de Cenicafé, y durante cuatro o cinco cosechas, Uribe (1983) estudió la respuesta de café a la aplicación de cuatro combinaciones de fósforo y pulpa descompuesta. En algunos casos aislados el fósforo fue contraproducente para la producción de café, mientras que en otros generó un efecto positivo, pero de baja magnitud (Figura 16). En ninguna de las localidades la pulpa descompuesta influyó en la producción, comportamiento que se relacionó con las bajas dosis utilizadas (aproximadamente 100 g/planta/año).

Uribe y Salazar (1983) determinaron la influencia de la pulpa de café en la producción de cafetales en cinco Subestaciones de Cenicafé. Los resultados demostraron la bondad

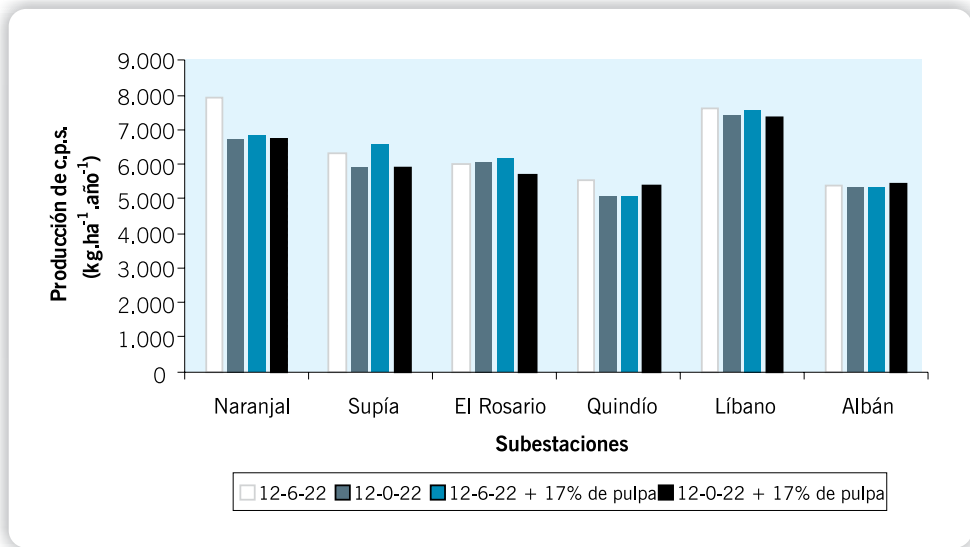
**Tabla 10.** Cantidad de abono orgánico requerido por planta y hectárea, según el tamaño del hoyo, la densidad de siembra y la relación de mezcla con el suelo.

Dimensiones del hoyo	Tamaño del hoyo (cm <sup>3</sup> )	Cantidad de abono orgánico					
		Por hoyo (g)	Por hectárea según la densidad de siembra (m <sup>3</sup> )				
			2.000 plantas/ha	4.000 plantas/ha	6.000 plantas/ha	8.000 plantas/ha	10.000 plantas/ha
<b>Relación de mezcla abono orgánico:suelo = 1:3 (v/v)</b>							
25x25x30 cm	18.750	4.688	9,4	18,8	28,1	37,5	46,9
25x25x30 cm	21.875	5.469	10,9	21,9	32,8	43,8	54,7
30x30x30 cm	27.000	6.750	13,5	27,0	40,5	54,0	67,5
30x30x35 cm	31.500	7.875	15,8	31,5	47,3	63,0	78,8
35x35x30 cm	36.750	9.188	18,4	36,8	55,1	73,5	91,9
35x35x35 cm	42.875	10.719	21,4	42,9	64,3	85,8	107,2
40x40x30 cm	48.000	12.000	24,0	48,0	72,0	96,0	120,0
40x40x35 cm	56.000	14.000	28,0	56,0	84,0	112,0	140,0
<b>Relación de mezcla abono orgánico:suelo = 1:4 (v/v)</b>							
25x25x30 cm	18.750	3.750	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5
25x25x30 cm	21.875	4.375	8,8	17,5	26,3	35,0	43,8
30x30x30 cm	27.000	5.400	10,8	21,6	32,4	43,2	54,0
30x30x35 cm	31.500	6.300	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0
35x35x30 cm	36.750	7.350	14,7	29,4	44,1	58,8	73,5
35x35x35 cm	42.875	8.575	17,2	34,3	51,5	68,6	85,8
40x40x30 cm	48.000	9.600	19,2	38,4	57,6	76,8	96,0
40x40x35 cm	56.000	11.200	22,4	44,8	67,2	89,6	112,0
<b>Relación de mezcla abono orgánico:suelo = 1:5 (v/v)</b>							
25x25x30 cm	18.750	3.125	6,3	12,5	18,8	25,0	31,3
25x25x30 cm	21.875	3.646	7,3	14,6	21,9	29,2	36,5
30x30x30 cm	27.000	4.500	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0
30x30x35 cm	31.500	5.250	10,5	21,0	31,5	42,0	52,5
35x35x30 cm	36.750	6.125	12,3	24,5	36,8	49,0	61,3
35x35x35 cm	42.875	7.146	14,3	28,6	42,9	57,2	71,5
40x40x30 cm	48.000	8.000	16,0	32,0	48,0	64,0	80,0
40x40x35 cm	56.000	9.333	18,7	37,3	56,0	74,7	93,3

Continúa...

...Continuación

Dimensiones del hoyo	Tamaño del hoyo (cm <sup>3</sup> )	Por hoyo (g)	Cantidad de abono orgánico				
			Por hectárea según la densidad de siembra (m <sup>3</sup> )				
			2.000 plantas/ha	4.000 plantas/ha	6.000 plantas/ha	8.000 plantas/ha	10.000 plantas/ha
Relación de mezcla abono orgánico:suelo = 1:6 (v/v)							
25x25x30 cm	18.750	2.679	5,4	10,7	16,1	21,4	26,8
25x25x30 cm	21.875	3.125	6,3	12,5	18,8	25,0	31,3
30x30x30 cm	27.000	3.857	7,7	15,4	23,1	30,9	38,6
30x30x35 cm	31.500	4.500	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0
35x35x30 cm	36.750	5.250	10,5	21,0	31,5	42,0	52,5
35x35x35 cm	42.875	6.125	12,3	24,5	36,8	49,0	61,3
40x40x30 cm	48.000	6.857	13,7	27,4	41,1	54,9	68,6
40x40x35 cm	56.000	8.000	16,0	32,0	48,0	64,0	80,0

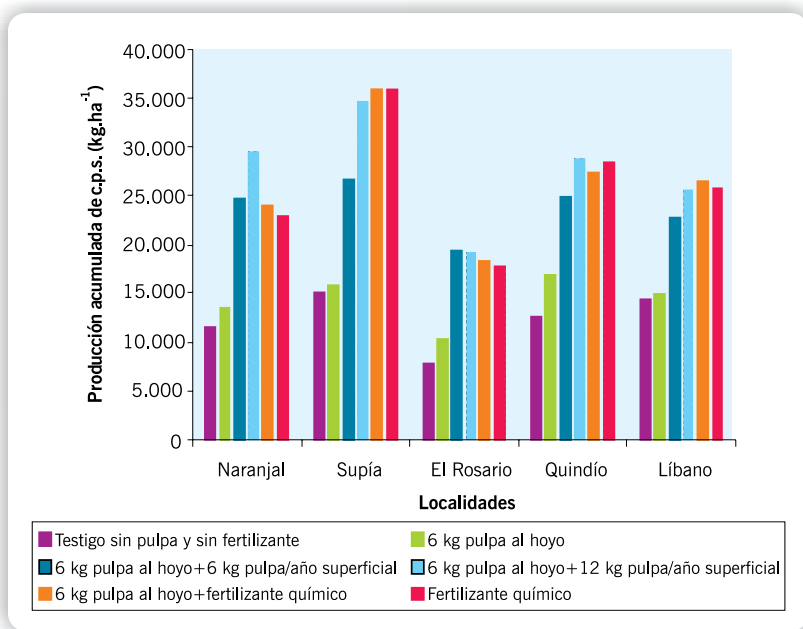


**Figura 16.** Efecto de la pulpa de café descompuesta y la fertilización química en la producción de cafetales en cinco sitios de Colombia. Tomado de Uribe (1983).

**Tabla 11.** Recomendaciones para la fertilización nitrogenada en la etapa de crecimiento vegetativo del café con base en el contenido de la materia orgánica del suelo (MO).

Contenido de MO	Dosis de nitrógeno (g/planta)				
	Mes 1 ó 2*	Mes 6	Mes 10	Mes 14	Mes 18
MO ≤ 8%	7	9	12	14	16
MO > 8%	5	7	9	12	14

\* Mes después de siembra



**Figura 17.** Efecto de la pulpa de café descompuesta y fertilización química en la producción de cafetales, en cinco sitios de Colombia (Producción acumulada de tres cosechas en Naranjal y El Rosario, y cuatro cosechas en Líbano, Supía y Quindío). Tomado de Uribe y Salazar (1983).

de la pulpa, pues en todas las localidades se encontró efecto positivo de este fertilizante orgánico, aun en aquellas con alto contenido de MO (Figura 17). En general, la aplicación de pulpa de 6 y 12 kg/planta/año ocasionó incrementos en la producción comparables con el fertilizante químico; sin embargo, en algunas ocasiones la dosis más alta resultó mayor al fertilizante químico, y en otras la dosis más baja fue inferior a éste. La incorporación de la pulpa al hoyo en el momento de la siembra sólo se justificó en suelos con bajo contenido de MO, en este mismo sentido, el efecto residual de la pulpa fue relativamente corto, por lo tanto se sugiere aplicarlo de manera continuada todos los años si se quiere conservar su efectividad como fertilizante en los cafetales.

Para cafetales a plena exposición solar y con alta densidad de siembra (10.000 plantas/ha), Arcila y Farfán (2007) presentan los registros de producción de c.p.s. de tres Subestaciones Experimentales de Cenicafé, al emplear diferentes dosis de lombrinaza, cuyos resultados se comparan frente a un testigo sin fertilizar y un tratamiento de fertilización con base en el análisis de suelos (Tabla 12). En este estudio se demostró que con la aplicación de 2 a 3 kg/planta/año de lombrinaza, es posible obtener una producción igual o mayor que la obtenida con la fertilización química realizada con base en el análisis de suelos.

Es pertinente aclarar que al igual que para los fertilizantes químicos, la cantidad del abono orgánico se debe expresar en kilogramos por hectárea ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), si de un cafetal en

producción se trata. Lo anterior, debido a que en esta etapa existe competencia entre las plantas y, por lo tanto, el manejo va dirigido a las poblaciones y no a los individuos (Sadeghian y Gaona, 2005). Caso contrario ocurre con la etapa de crecimiento vegetativo (levante), en la cual las cantidades de los abonos se expresan por planta o por sitio, dado que para esta fase se considera poca la competencia entre las plantas, y por lo tanto, el manejo va dirigido a individuos y no a poblaciones. Adicionalmente, cuando las recomendaciones de fertilización se dan por planta y se obvian los requerimientos por unidad de área (por ejemplo, por hectárea), la información transferida queda incompleta para fines económicos y prácticos. Este hecho reviste mayor importancia si de abonos orgánicos se trata, pues su cantidad es mucho mayor que los fertilizantes químicos; por ejemplo, en el trabajo de Uribe y Salazar (1983) la dosis más baja de la pulpa de café a la que se obtuvo respuesta (6 kg/planta/año para plantaciones con 4.444 plantas/ha), lo cual representa 26,7 t/ha/año de abono orgánico.

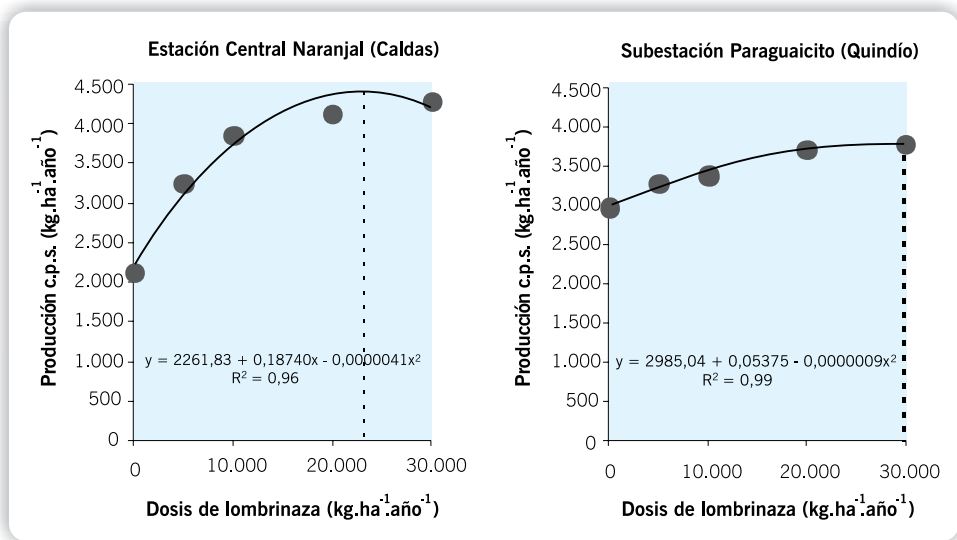
En el caso del trabajo de Arcila y Farfán (2007), la cantidad de lombrinaza por planta podrá ser de 2 a 3 kg/planta, si la densidad es de 10.000 árboles/ha, mientras que para una plantación de 5.000 árboles/ha, la dosis por planta será el doble de este valor o un poco menos, si se tiene en cuenta el ajuste propuesto por Sadeghian (2008), en relación con el nivel de sombra y la densidad de siembra.

Con base en los datos presentados por Arcila y Farfán (2007), consignados en la Tabla 12, se determinaron las funciones de respuesta a dosis crecientes de lombrinaza, para Naranjal y Paraguaicito (Figura 18). Este ejercicio permite estimar los óptimos biológicos y económicos. De acuerdo a las ecuaciones cuadráticas descritas, para la Estación Central Naranjal la máxima producción, es decir, el óptimo biológico (4.414 kg de c.p.s.) se obtiene al aplicar 22.966 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de lombrinaza; en Paraguaicito este punto óptimo (3.787,4 kg de c.p.s.) ocurre con 29.859 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de lombrinaza. Nótese que la magnitud de la respuesta es relativamente mayor en Naranjal, pues con las primeras dosis se generan incrementos más altos que en Paraguaicito.

**Tabla 12.** Respuesta de café a la lombrinaza y fertilización química en tres Subestaciones de Cenicafé. Tomado de Arcila y Farfán (2007).

Tratamiento	Promedio de producción de c.p.s. (kg.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup> )		
	Paraguaicito (4 cosechas)	La Catalina (5 cosechas)	Naranjal (5 cosechas)
0,5 kg/planta/año de lombrinaza	3.272,5 bc	3.011,3 b	3.255,0 b
1,0 kg/planta/año de lombrinaza	3.388,8 abc	3.546,3 ab	3.871,3 ab
2,0 kg/planta/año de lombrinaza	3.717,5 ab	3.766,3 a	4.133,8 a
3,0 kg/planta/año de lombrinaza	3.782,5 a	3.965,0 a	4.296,3 a
Fertilización con base en análisis de suelo	3.633,8 ab	3.972,5 a	3.198,8 b
Testigo sin fertilización	2.973,8 c	3.267,5 ab	2.115,0 c

De acuerdo a las funciones presentadas en la Figura 18, es posible calcular una serie de óptimos económicos, basándose en un rango relativamente amplio de precios de café y de cantidades de lombrinaza (Tabla 13). Debido a que en este experimento en particular, la respuesta a la lombrinaza tiene una mayor magnitud en Naranjal, es muy rentable realizar la práctica de fertilización con este abono orgánico, aun con altos precios de lombrinaza (\$ 200/kg) y bajos precios del café pergamino seco (\$ 3.200/kg). En contraposición, al aplicar este mismo análisis a Paraguaicito, el balance es negativo.



**Figura 18.** Respuesta del café a dosis crecientes de lombrinaza en las Subestaciones Naranjal y Paraguaicito. Datos originales tomados de Arcila y Farfán (2007).

**Tabla 13.** Cantidad de lombrinaza a aplicar (kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>) para alcanzar el óptimo económico, de acuerdo a los precios de café y la cantidad de lombrinaza.

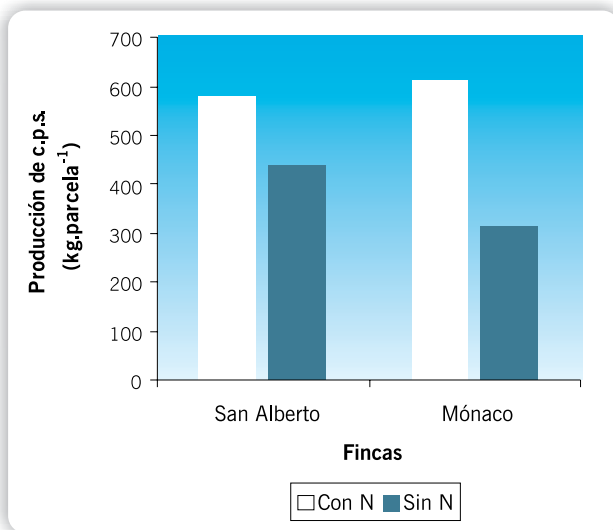
Precio de c.p.s. (\$)		Estación Central Naranjal				Subestación Paraguaicito			
		Precio de lombrinaza (\$/kg)				Precio de lombrinaza (\$/kg)			
arroba	kg	50	100	150	200	50	100	150	200
40.000	3.200	21.051	19.136	17.221	15.307	21.179	12.498	3.817	<b>-4.863</b>
50.000	4.000	21.434	19.902	18.370	16.838	22.915	15.970	9.026	2.081
60.000	4.800	21.689	20.413	19.136	17.860	24.072	18.285	12.498	6.711
70.000	5.600	21.872	20.777	19.683	18.589	24.899	19.938	14.978	10.018
80.000	6.400	22.008	21.051	20.094	19.136	25.519	21.179	16.838	12.498

## Materia orgánica del suelo (MO) y su relación con la producción

En dos fincas del departamento del Quindío, Sadeghian *et al.*, (2005) midieron la respuesta del café al suministro de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio, y su relación con los niveles de estos elementos en el suelo. Cuando se eliminó el nitrógeno de los planes de fertilización, la producción se disminuyó significativamente en los dos sitios (Figura 19), pero con implicaciones diferentes, pues mientras que en la finca San Alberto, con 9% de MO, la producción bajó en 21% al eliminar el N de los planes de fertilización, en Mónaco, con 4% de MO, la disminución fue del 47%.

Con el propósito de determinar el efecto de la fertilidad del suelo sobre la producción de café, Sadeghian (2008) llevó a cabo una investigación en 32 lotes cafeteros, ubicados en diez departamentos de Colombia. De acuerdo a los resultados de esta investigación, el comportamiento de la producción de café en función de los niveles de la MO, como indicador de la disponibilidad de nitrógeno (N), se ajusta a una tendencia cuadrática (Figura 20). A medida que aumentan los contenidos de la MO también se incrementan los rendimientos hasta alcanzar un nivel máximo (18%), después del cual el rendimiento desciende en respuesta a la disminución de la tasa de mineralización. De acuerdo a este autor, en suelos con niveles de MO menores al 8% o mayores al 30%, el rendimiento se reduce en más del 50% al eliminar el N de los planes de fertilización.

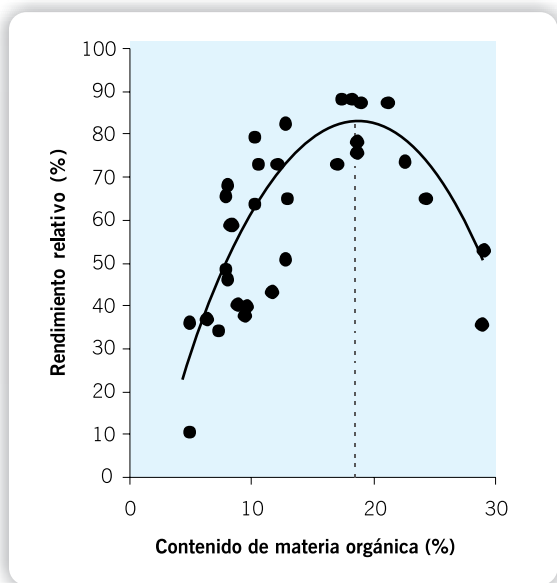
Con base en la anterior investigación, Sadeghian *et al.* (2008) recomienda tener en cuenta el nivel de la MO del suelo para la recomendación de N (Tabla 14). En este sentido, se sugiere aplicar entre 240 y 300 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N para cafetales con altas densidades y muy poco sombreados, según el nivel de la MO. Adicionalmente, estas dosis se ajustan de acuerdo al nivel de sombra y la densidad de siembra.



**Figura 19.** Efecto del nitrógeno sobre la producción de café en dos fincas del departamento del Quindío (producción acumulada de 4 cosechas).

En el tratamiento “Con N” se aplicaron cantidades equivalentes a 240 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N y K<sub>2</sub>O , 80 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 60 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de MgO. En el tratamiento “Sin N” se excluyó este elemento, pero se aplicaron los demás nutrientes.

Tomado de Sadeghian *et al.* (2005).



**Figura 20.** Efecto de la materia orgánica del suelo (MO), sobre el rendimiento de café. Tomado de Sadeghian (2008).

**Tabla 14.** Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de café ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), con base en los contenidos de la materia orgánica del suelo (MO), el nivel de sombra y la densidad de siembra.

Contenido de MO (%)	----- Nivel de sombra -----					
	Densidad mayor de 7.500*	----- Menor de 35% -----		----- Entre 35 y 45% ---		Entre 45 y 55%
		Densidad entre 5.000 y 7.500	Densidad menor de 5.000	Densidad entre 5.000 y 7.500	Densidad menor de 5.000	Densidad menor de 5.000
$\text{MO} \leq 8$	300	285	255	255	225	150
$8 < \text{MO} \leq 12$	280	266	238	238	210	140
$12 < \text{MO} \leq 16$	260	247	221	221	195	130
$16 < \text{MO} \leq 20$	240	228	204	204	180	120
$\text{MO} > 20$	260	247	221	221	195	130

\* Plantas/ha



## Literatura citada

- ARANGO B., L.G.; DÁVILA A., M.T. Descomposición de la pulpa de café por medio de la lombriz roja californiana. *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) No. 161:1-4. 1991.*
- ARCILA P., J.; FARFÁN V., F. Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en los sistemas de producción de café. In: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. *Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé - FNC, 2007. p. 201-232.*
- ÁVILA R., W.E.; SADEGHIAN K., S.; SÁNCHEZ A., P.M.; CASTRO F., H.E. Producción de almácigos de café en el departamento de Santander con diferentes fuentes de materia orgánica y de fósforo. *Avances Técnicos Cenicafé 356:1-12. 2007.*
- BLANDÓN C., G.; DÁVILA A., M. T.; RODRÍGUEZ V., N. Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé 50(1):5-23. 1999.*
- CADENA G., G. Uso de la pulpa de café para el control de la mancha de hierro Berk y Cooke, en almácigos. *Cenicafé 33(3):76-90. 1982.*
- CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN K., S. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de spp. *Cenicafé 56(2):127-141. 2005.*
- CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN K., S. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé 56(4):348-364. 2005.*
- CARRILLO P., I.F.; CHAVES C., B. La materia orgánica y su relación con el nitrógeno. In: CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 7. Bucaramanga (Colombia), Octubre 5-8, 1994. *Resúmenes. Bucaramanga (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1994.*
- DÁVILA A., M.T.; RAMÍREZ G., C.A. Lombricultura en pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé No. 225:1-11. 1996.*
- DIAZ M., C. Efecto del enclamiento sobre el crecimiento de las plantas de café en la etapa de almácigo. *Manizales, Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2006. 246 p. (Tesis: Ingeniera Agrónoma).*
- FARFÁN V. F.; URREGO J. B. Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de , y , en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé 58(1):20-39. 2007.*
- GÓMEZ A., A. Erosión en cafetales, bajo diferentes sistemas de manejo. *Avances Técnicos Cenicafé No. 19:1-4. 1972.*
- GUZMÁN G., C.A.; RIAÑO H., N.M. Respuesta de plantas de café en etapa de almácigo a la fertilización foliar. *Avances Técnicos Cenicafé No. 232:1-4. 1996.*
- JIMÉNEZ S., A.M.; FARFÁN V., F.; MORALES L., C.S. Descomposición y transferencia de nutrientes de , y como abonos verdes en cafetales. *Cenicafé 56(3):216-236. 2005.*
- LÓPEZ A., M. Cambios químicos en el suelo ocasionados por adición de materia orgánica: su valor residual y su efecto sobre plántulas de café hasta un año de edad. *Cenicafé 17(4):121-131. 1966.*

- MACHADO S., A. Experimentos sobre fertilizantes químicos y orgánicos en los cafetales. *Cenicafé* 3(32):37-39. 1952.
- MACHADO S., A. Algunos resultados experimentales con fertilizantes en cafetos. *Cenicafé* 9(7-8):157-198. 1958.
- MESTRE M., A. Utilización de la pulpa en almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé* 28:1-2. 1973.
- MESTRE M., A. Evaluación de la pulpa de café como abono para almácigos. *Cenicafé* 28(1):18-26. 1977.
- OCHOA M., W.A.; SUÁREZ V., S.; SADEGHIAN K., S. Variabilidad espacial del Nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé (Colombia)* 54(2):179-189. 2003.
- PARRA H., J. El valor fertilizante de la pulpa de café. *Cenicafé* 10(10):441-460. 1959.
- PATÍÑO G., M.A. Caracterización de la fertilidad del suelo en la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca. Manizales (Colombia), Universidad de Caldas, 2005. 195 p. (Tesis: Ingeniera Agrónoma).
- SADEGHIAN K., S. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3):242-257. 2003.
- SADEGHIAN K., S. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafé No. 32*:1-43. 2008.
- SADEGHIAN K., S. Respuesta a N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. In: CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 14. Villavicencio (Colombia), Octubre 29-31, 2008. Villavicencio (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2008.
- SADEGHIAN K., S.; GARCÍA L., J.C.; MONTOYA R., E.C. Respuesta del cafeto a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé* 57(1):58-69. 2005.
- SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; ARCILA P., J. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 57(4):251-261. 2006.
- SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; ARCILA P., J. Composición elemental de los frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha. *Avances Técnicos Cenicafé No. 364*:1-8. 2007.
- SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé (Colombia)* 56(4):381-397. 2005.
- SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé No. 326*:1-8. 2004.
- SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Almácigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Cenicafé* 59(2):91-102 2008.
- SALAZAR A., J.N. La pulpa de café transformada por la lombriz es un buen abono para almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé* 178: 1-2. 1992.

- SALAZAR A., J.N.; MESTRE M., A. Utilización de la gallinaza como abono en almácigos de café. Avances Técnicos Cenicafé 148: 1-2. 1990.
- SALAZAR A., J.N.; MESTRE M., A. Uso de la cenichaza como sustrato en almácigos de café. Cenicafé (Colombia) 44(1):20-28. 1993.
- SALAZAR A., J.N.; MONTESINO S., J.T. Uso del estiércol de ganado como sustrato en almácigos de café. Avances Técnicos Cenicafé 207: 1-4. 1994.
- URIBE H., A. Los cafeteros colombianos botan anualmente siete millones de pesos. Agricultura Tropical (Colombia) 12(3):183-185. 1956.
- URIBE H., A. Efecto del fósforo en la producción de café. Cenicafé 34(1):3-15. 1983.
- URIBE H., A.; SALAZAR A., J.N. Influencia de la pulpa del café en la producción del cafeto. Cenicafé 34(2):44-58. 1983.
- VALENCIA A., G. Utilización de la pulpa de café en los almácigos. Avances Técnicos Cenicafé No. 17:1-2. 1972.
- VALENCIA A., G. Fertilización foliar en almácigos de café. Avances Técnicos Cenicafé No. 49:1-2. 1975.

# Producción y descomposición de biomasa seca y transferencia de nutrientes en sistemas agroforestales con café

Fernando Farfán Valencia, Ingeniero Agrónomo  
Investigador, Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé.

## INTRODUCCIÓN

El componente arbóreo en un sistema agroforestal busca optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad por unidad de terreno, además de ser fuente de energía, madera, frutos y/o sombrero, puede regular las condiciones de luz para el cultivo principal y suplir parte de los nutrientes requeridos por él; así mismo, con una densidad suficiente de árboles se logran reducir los vientos fuertes, lo que contribuye a la protección del suelo y del café (74). Los árboles también aportan gran cantidad de residuos vegetales que actúan como material de cobertura (37); la capa de hojarasca es el eslabón que mantiene unidos los componentes arbóreos con el suelo, esta capa a su vez, por procesos de descomposición y mineralización, liberará nutrientes que podrán ser nuevamente absorbidos por las plantas (59, 66).

El retorno anual de la materia orgánica y bioelementos al suelo a través de la hojarasca, es uno de los condicionantes más importantes en la renovación del ecosistema agroforestal. El efecto que la acumulación de los restos orgánicos en la superficie del suelo tiene sobre la productividad, ha inducido a muchos autores, al estudio de la cinética de la descomposición de la hojarasca (5, 13). El posible papel de las especies arbóreas sobre la circulación de nutrientes en su ecosistema, depende de la cantidad de material reciclable y de su tasa de descomposición. Por ello, es importante la identificación de las especies con influencia positiva sobre la restauración de la fertilidad del suelo, para utilizarlas en el diseño de plantaciones arbóreas mixtas y sistemas agroforestales (34, 44, 74).

En diversas partes del mundo es evidente una gran variedad de modalidades del cultivo del café, en tanto que las condiciones agroecológicas que prevalecen determinan esta modalidad. Existen fundamentalmente dos tipos de sistemas de cultivo, monocultivo y sistemas agroforestales. En Colombia, es común el cultivo del café bajo árboles de sombrero o en sistemas agroforestales, definidos como asociaciones deliberadas o sistemáticas de árboles con cultivos en el mismo espacio (16, 17, 29, 37, 67); en este artículo se presentan los resultados de las investigaciones realizadas por Cenicafé, en dos localidades

de la zona cafetera central y sur de Colombia, en las cuales se evaluó el aporte y descomposición de la hojarasca como material vegetal, y la transferencia de nutrientes que este material realiza al suelo en sistemas agroforestales con café.

• **Aporte y descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*.**

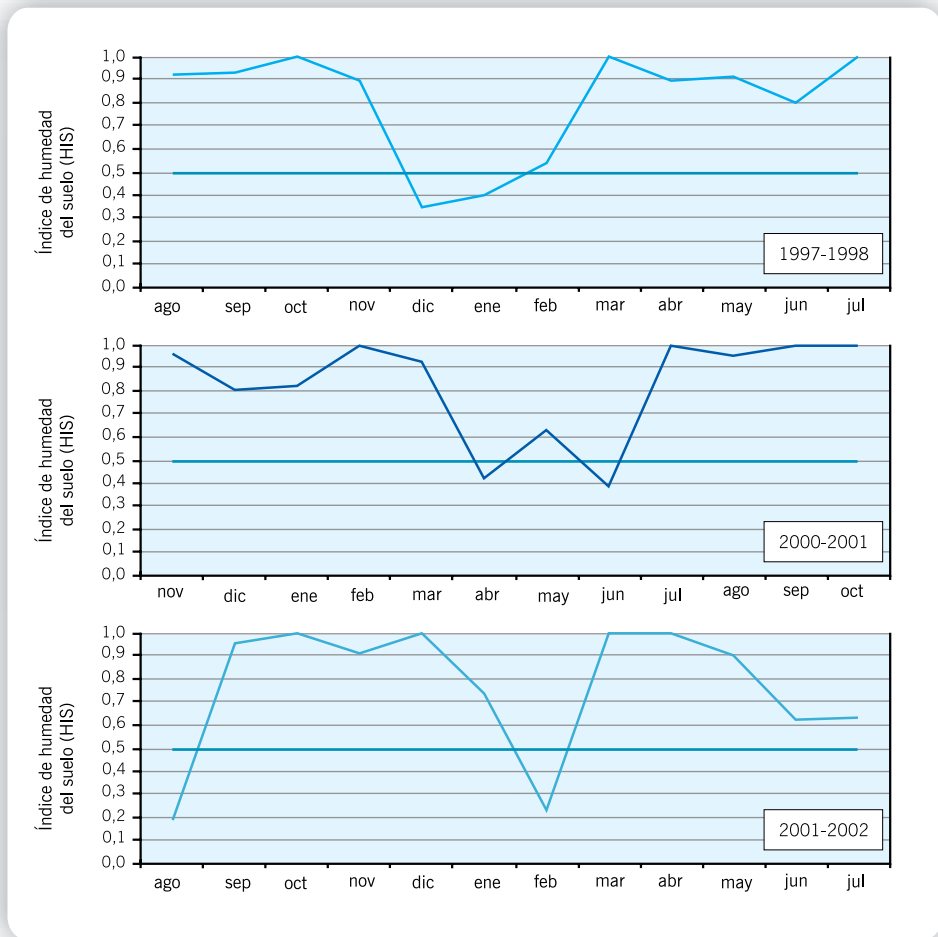
**Descripción del sitio de estudio.** El estudio se localizó en la Subestación Experimental Paraguaicito, situada en el municipio de Buenavista (Quindío). La ubicación geográfica, clima (9, 10, 11) y las características de suelos (19) se presentan en la Tabla 1.

Para el estudio fueron consideradas dos fases. La primera, comprendida entre agosto de 1997 y julio de 1998 y noviembre de 2000 y octubre de 2001, durante la cual se evaluó el aporte de materia seca producida por el café a libre exposición solar, el café bajo sombrío y la biomasa seca producida por tres especies forestales que dieron sombra al café. La segunda fase comprendida entre agosto de 2001 y julio de 2002, período en el cual se evaluó la tasa de descomposición de residuos vegetales y la transferencia de nutrientes; en este segundo período en La Subestación Experimental se registró una humedad relativa del 85,0%, precipitación de 2.269 mm.año<sup>-1</sup> y un promedio de temperatura de 17,0°C (9).

En la Figura 1, se presentan los Índices de Humedad del Suelo (IHS) calculados para la Subestación Experimental Paraguaicito para los tres períodos de estudio. El IHS muestra el comportamiento de la humedad del suelo en una región, el cual se obtiene dividiendo la evapotranspiración real entre la evapotranspiración potencial, cantidades que se estiman de la contabilidad de entradas y salidas, denominado balance hídrico (1, 24, 30). El IHS calculado para esta localidad indicó que en los meses de diciembre a febrero del primer período, abril y junio del segundo, y entre agosto de 2001 y en febrero de 2002, se

**Tabla 1.** Características climáticas y de suelos de la Subestación Experimental Paraguaicito.

Localización geográfica			
Latitud Norte	04° 23'		
Longitud Oeste	75° 44'		
Altitud (m)	1.250		
Características de suelos			
pH	5,7	Ecotopo	211A
Materia Orgánica (%)	6,7	Unidad Cartográfica	Consociación Montenegro
Nitrógeno (%)	0,28	Grupo taxonómico	Typic Hapludands
Fósforo (ppm)	2,5	Material Parental	Cenizas Volcánicas
Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,78		
Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	2,90		
Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,08		



**Figura 1.** Índice de humedad del suelo (HIS) para tres períodos de estudio (1997/98; 2000/01 y 2001/02), en la Subestación Experimental Paraguaicito. Registros por debajo de la línea azul indican deficiencias hídricas en el suelo.

presentaron deficiencias hídricas en el suelo. Los valores de las variables climáticas para el cálculo del IHS, fueron las registradas en la estación meteorológica de la Subestación Experimental.

**Material vegetal.** Se emplearon las especies forestales *Cordia alliodora* (nogal cafetero), *Pinus oocarpa* (pino) y *Eucalyptus grandis* (eucalipto) como sombrío del café, y *Coffea arabica*. c.v. Colombia.

**Tratamientos y diseño experimental.** Los tratamientos consistieron en el establecimiento de (I) café con sombrío de nogal, (II) café con sombrío de pino, (III) café con sombrío de eucalipto y (IV) café a libre exposición solar. Se empleó un diseño de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales.

Cada unidad experimental contó con 36 árboles de sombrío plantados a 6,0 x 6,0 m, y al interior de este arreglo espacial se estableció el café a 1,5 x 1,5 m (4.500 plantas/ha). Entre bloques se dejaron franjas de 6,0 m de ancho, para reducir el efecto de la sombra proyectada por el sombrío de los bloques contiguos. En términos de área, cada parcela ocupó 1.296 m<sup>2</sup>.

Los bloques se ubicaron de manera que se maximizaran entre ellos las diferencias topográficas y de uso previo del suelo, mientras se minimizaban las diferencias entre las parcelas que los constituyeron.

**Establecimiento y plan de fertilización.** El estudio se inició en 1994 con el establecimiento de las especies forestales y un año después (octubre de 1995), se estableció el café. Dos semanas después del establecimiento se realizaron inventarios de supervivencia y se repusieron las plantas faltantes. La distancia de siembra del café fue de 1,5 x 1,5 m (4.500 plantas/ha) y el sombrío a 6,0 x 6,0 m (278 plantas/ha).

Al momento de establecer las especies de sombra se aplicaron 70 g de NPK en formulación 15-38-10, al fondo del hoyo, cabe anotar que no se realizaron posteriores fertilizaciones. Tres meses después de establecido el café se realizó una aplicación de 20 g/planta de Urea, seis meses después se realizó una segunda aplicación del mismo fertilizante, en dosis de 30 g/planta. El plan anual de fertilización fue el recomendado en el análisis de suelos: 700 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de un fertilizante completo, 17-6-18-2; esta dosis se fraccionó en dos aplicaciones en el año, dirigiendo la aplicación al sitio de siembra de la planta.

## Variables evaluadas

**Aporte de hojarasca.** Para evaluar la cantidad de materia orgánica depositada como hojarasca por las diferentes especies de sombra, se instalaron en cada una de las parcelas experimentales con café y sombrío, cinco trampas de follaje de 0,5 m<sup>2</sup> de superficie, cada una. Éstas se instalaron en la primera semana de julio de 1997, dos años y nueve meses después del establecimiento de las especies sombrío, y un año después que *Cordia alliodora* y *Eucalyptus grandis* iniciaran el aporte periódico de hojarasca. Entre agosto de 1997 y julio de 1998, se recolectaron mensualmente todas las hojas encontradas en las trampas de follaje.

Con el propósito de observar la evolución de los aportes de hojarasca como función de la edad de las especies, se realizó un segundo muestreo, siete años después de iniciado el estudio (entre noviembre de 2000 y octubre de 2001).

**Determinación de la concentración y contenido de nutrientes.** Del material vegetal obtenido mensualmente de las trampas de recolección se tomaron tres submuestras de cada especie de sombrío, para determinar la concentración de nutrientes, como son: N por el método semimicro Kjeldahl, P por colorimetría (Molibdovanadato de amonio), K, Ca y Mg, mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA). También se determinó el contenido de materia orgánica. Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y cenizas se expresaron en porcentaje (%). Para determinar el contenido de nutrientes se multiplicó la concentración de éste por el aporte de biomasa seca, en cada tratamiento. Los resultados presentados serán solo de N, P, K, Ca, Mg y materia orgánica, expresados en Mg.ha<sup>-1</sup>.

**Descomposición del material vegetal residual.** El método empleado para la determinación de la tasa de descomposición fue el de “bolsas de descomposición”, de acuerdo con Lupwayi y Haque (39). Las bolsas de descomposición se elaboraron con malla plástica de polietileno de 30 cm x 20 cm, con aberturas de malla de 1,0 x 1,0 mm. Se construyeron 504 bolsas, 108 para las especies forestales (3 especies forestales x 3 repeticiones x 12 meses) y 144 para el café proveniente de cada sistema de cultivo (4 sistemas de cultivo x 3 repeticiones x 12 meses); también se confeccionaron 252 bolsas, con las mismas características, para reemplazos ante eventuales pérdidas.

El material vegetal (hojas más pecíolos frescos), para el análisis de la tasa de descomposición de la materia seca producida por el café, bajo cada sistema de cultivo, y los producidos por *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*, se tomaron directamente de las plantas de café y de los árboles. El material vegetal no se recolectó del suelo, debido a que no se conocía el momento de su caída y el inicio de su descomposición; el material recolectado se llevó al laboratorio y se secó en una estufa a 80°C, durante 72 horas. Posteriormente, en cada bolsa se depositaron 100 g de material vegetal seco de cada una de las especies forestales y el café; y finalmente, las bolsas se ubicaron de manera aleatoria en cada parcela correspondiente.

Durante un período de 365 días (iniciando en agosto de 2001 y finalizando en julio de 2002), cada 30 días, de las parcelas experimentales se recolectaron 21 bolsas (tres por cada especie forestal y tres por cada sistema de cultivo de café). Las muestras se llevaron al laboratorio y se secaron en una estufa a 80°C, hasta obtener un valor de peso seco constante.

La descomposición del material evaluado mediante la pérdida de peso, correspondiente a cada tiempo de degradación, generó un porcentaje de peso seco remanente (**%Psr**), calculado mediante el cociente del peso seco al horno del material remanente mensual (**Psm**), sobre el peso seco al horno del material inicial (**Psi**):

$$\%Psr = (Psm/Psi) \times 100$$

Los **Psr** se determinaron para calcular la tasa de mineralización o descomposición del material vegetal. Debido a que la descomposición es proporcional al contenido de materia orgánica, la tasa relativa de descomposición o de transferencia de material vegetal mensual hacia el suelo puede ser representada por un modelo exponencial simple (50, 56, 63, 72, 73), del orden:

$$y = y_0 e^{-kt}$$

El modelo exponencial simple asume que

**y** : porcentaje de peso seco remanente o residual

**y<sub>0</sub>**: porcentaje de peso seco inicial

**t** : tiempo

**k** : tasa relativa de descomposición mensual o constante de velocidad de descomposición del residuo orgánico (49, 56).



El coeficiente de descomposición es un indicador de la “velocidad” con que se transforman o descomponen los residuos vegetales; la tasa de descomposición puede fluctuar entre 0,1/día para residuos de muy rápida descomposición y 0,00001/día en residuos de muy lenta degradación (11).

**Coefficiente Isohúmico ( $k_1$ ).** Definido como la constante de transformación en humus de la materia seca aportada o también como la fracción de la materia orgánica que queda sin descomponerse o se descompone muy lentamente después de un período de tiempo dado. Depende esencialmente, pero no exclusivamente, de las características del residuo orgánico (27, 34), y debido a la naturaleza de sus componentes, como ligninas y proteínas, Henin y Dupuis (27) y Saña (56), sugieren determinar este coeficiente a través de la fracción orgánica del residuo vegetal, que es relativamente resistente a la descomposición biológica, aplicando la siguiente expresión:

$$k_1 = Mo_{\text{humificada}} / Mo_{\text{aportada}}$$

**Biomasa seca descompuesta e incorporada al suelo.** Al final del período de las evaluaciones (12 meses), basados en los aportes totales de hojarasca y otros residuos producidos por las especies forestales y por el café, en sus diferentes sistemas de cultivo, se estimó la cantidad total de biomasa seca descompuesta e incorporada al suelo.

**Concentración de nutrientes en la biomasa seca inicial y remanente.** Del material vegetal obtenido directamente de los árboles y del café, se tomaron submuestras para determinar la concentración de nutrientes, las cuales se denominaron iniciales ( $C_i$ ) o en el día cero (0). Con las tres muestras mensuales de cada una de las especies forestales y del café, en cada sistema de cultivo, se conformó una muestra compuesta para su análisis químico. En todos los casos se determinó N por el método semimicro Kjeldahl, P por colorimetría (Molibdovanadato de amonio), K, Ca y Mg, mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA), y se determinó contenido de materia orgánica. Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y cenizas se expresaron en porcentaje (%).

**Liberación de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg).** Para la evaluación de la liberación o transferencia de nutrientes contenidos en la materia seca remanente de todas las especies forestales y del café, en sus diferentes sistemas de cultivo, también se empleó el modelo exponencial simple propuesto por Olson (50), Saña (56), Sinha *et al.* (63) y Wieder y Lang (72):

$$W_f = W_i e^{-kt}$$

Donde:

$w_f$ : cantidad remanente de N, P, K, Ca y Mg

$w_i$ : cantidad inicial de cada elemento mineral

$k$ : constante de liberación de nutrientes

$t$ : tiempo de descomposición de la hojarasca expresado en meses.

**Análisis de la información.** Se realizaron análisis de varianza para todas las variables evaluadas. La comparación de los coeficientes de descomposición de los residuos vegetales

de las especies forestales y el café, de los coeficientes de liberación de nutrientes y los coeficientes isohúmicos, entre otros, se realizaron mediante pruebas Tukey (5%). Para evaluar la influencia de la humedad del suelo (IHS) sobre la descomposición de los residuos vegetales, producidos por las especies forestales y el café, en un año, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

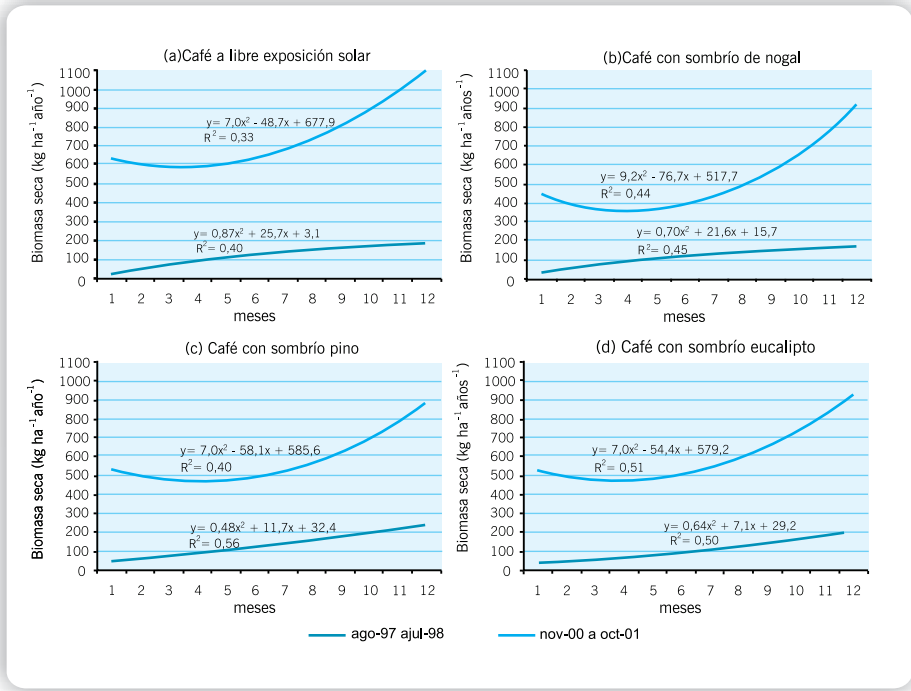
**Dinámica en el aporte de hojarasca del café y el componente arbóreo.** El aporte de biomasa seca en los sistemas agroforestales se presenta en la Tabla 2, y la dinámica del aporte se presenta en las Figuras 2 y 3. El promedio del aporte de materia seca (dos recolecciones) en café a libre exposición solar fue de 4,94 t.ha<sup>-1</sup> y bajo sombrío de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis* de 3,79; 4,56 y 4,11 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El promedio de la producción de residuos vegetales de nogal, pino y eucalipto fue de 3,46; 6,67 y 6,39 t.ha<sup>-1</sup>.

En *Picea abies*, Slodicak *et al.* (64), reportan producciones entre 8.500 a 8.700 kg.ha<sup>-1</sup> de materia seca; Snowdon y Benson (65) indican que la biomasa seca obtenida en *Pinus radiata* fue de 5,0 t.ha<sup>-1</sup>, y Lugo *et al.* (38) obtuvieron producciones de biomasa seca de 27,8; 20,4; 10,1; 7,7 y 5,5 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en *Casuarina equisetifolia*, *Albizia procera*, *Eucalyptus robusta*, y dos variedades de *Leucaena leucocephala*, respectivamente, a los cinco años de edad. En sistemas agrosilviculturales donde el componente arbóreo fue *Grewia optiva*, *Celtis australis*, *Bauhinia variegata*, *Albizia chinensis*, *Toona ciliata* y *Morus serrata*, Parkash *et al.* (51), estimaron que la producción de biomasa seca fue de 48,0 t.ha<sup>-1</sup>. Puri *et al.* (53), indican que dependiendo de la densidad de siembra (278, 625 y 2.500 plantas/ha), la producción de biomasa seca producida por *Populus deltoides* puede variar entre 71,5 y 251,0 t.ha<sup>-1</sup>.

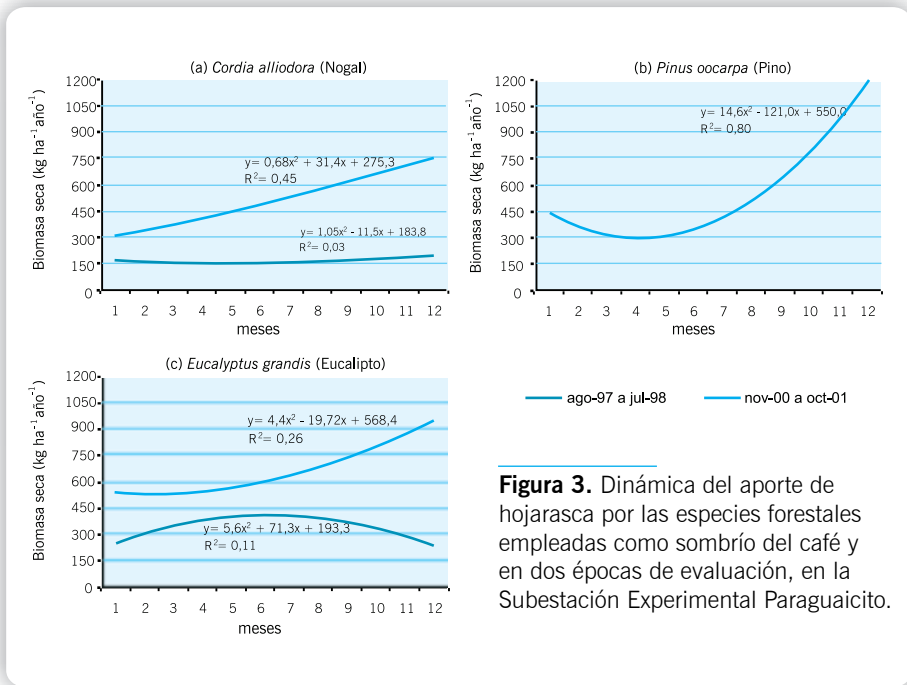
**Tabla 2.** Aporte de biomasa seca de tres especies forestales y el café, en dos períodos de evaluación. Subestación Experimental Paraguaicito.

Especies	Producción de biomasa seca (t.ha <sup>-1</sup> )		
	1 <sup>er</sup> año	2 <sup>o</sup> año	Media
Café a libre exposición	1,47 a	8,40 a	4,94
Café + <i>C. alliodora</i>	1,42 a	6,16 b	3,79
Café + <i>P. oocarpa</i>	1,61 a	7,52 ab	4,56
Café + <i>E. grandis</i>	1,32 a	6,90 b	4,11
<i>Cordia alliodora</i>	1,99 a	4,93 b	3,46
<i>Pinus oocarpa</i> *	-	6,67 ab	6,67
<i>Eucalyptus grandis</i>	4,67 a	8,12 a	6,40

\*De pino se presenta la producción de biomasa seca solo del segundo año. Valores con diferente letra indican diferencias estadísticas.



**Figura 2.** Dinámica del aporte de hojarasca por el café cultivado a libre exposición solar y bajo tres especies de sombra y en dos épocas de evaluación, en la Subestación Experimental Paraguaicito.



**Figura 3.** Dinámica del aporte de hojarasca por las especies forestales empleadas como sombrío del café y en dos épocas de evaluación, en la Subestación Experimental Paraguaicito.

La dinámica en el aporte de hojarasca por el café en cada sistema de cultivo, independiente de si se siembra a libre exposición solar o bajo sombrío, indica que en la primera recolección de hojarasca (agosto de 1997 y julio de 1998), las mayores producciones de residuos vegetales se presentaron en febrero y entre junio y julio de 1998, las deficiencias de agua en el suelo para esta fase de las evaluaciones, se registraron en los meses de diciembre a febrero. En el segundo período de evaluación (noviembre de 2000 y octubre de 2001), los mayores aporte de biomasa seca por el café se presentaron entre mayo y agosto de 2001, y las tasas más bajas de estos aportes se registraron entre noviembre y diciembre del mismo año, con deficiencias hídricas registradas entre abril y junio.

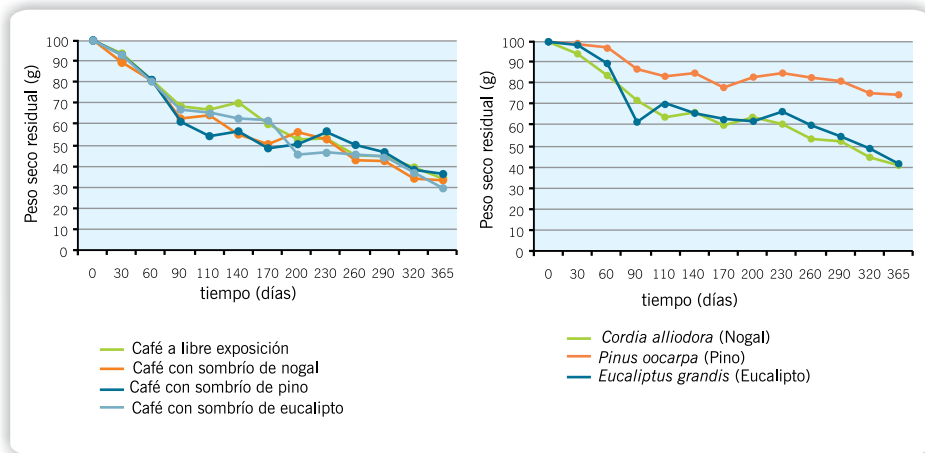
El nogal cafetero, empleado como sombrío del café bajo las condiciones de la S. E. Paraguaicito, tuvo sus mayores aporte de biomasa seca durante los meses mayo a julio ( $55,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de su primera evaluación, mientras que el lapso de menor producción de residuos fue entre febrero y abril ( $459,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). En la segunda evaluación la mayor producción de hojarasca se registró en los mismos meses ( $2.056,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y los meses de menor aporte fueron agosto a octubre ( $969,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

El pino, en su único período de evaluaciones, hizo sus mejores aportes de hojarasca en el lapso entre mayo y julio ( $2.986,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), con un descenso en su transferencia de material orgánico, en los meses de noviembre de 2000 a enero de 2002 ( $928,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). En cuanto al comportamiento productivo de hojarasca por parte del eucalipto, en su primera evaluación, realizó los mayores aportes en los meses de diciembre de 2007 y febrero de 2008 ( $1.247,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y los menores entre mayo y julio de 2001 y agosto de 2000 ( $801,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); en el segundo período (2000-2001) la mayor cantidad se registró en los meses de mayo a julio ( $2.660,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y la más baja producción en los meses de noviembre a diciembre de 2000 y enero de 2001 ( $1.648,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

El que se hallan registrado diferencias de un mes entre la ocurrencia de picos en el aporte de hojarasca entre el eucalipto y el nogal, como consecuencia de la disminución en la precipitación, pone de manifiesto dos cosas: (I) la mayor sensibilidad de *Eucalyptus grandis* a períodos de déficit hídrico, indicado por la rápida respuesta en el aporte de hojarasca, a pesar de que la humedad del suelo es mayor en las parcelas de eucalipto que en las de nogal, y (II) la existencia de un mecanismo de control que le permite a esta especie reducir las pérdidas de agua por transpiración (70).

La existencia de tal mecanismo ha sido comprobada en otras especies del género *Eucalyptus* en diversos estudios realizados en India, Israel y Australia, países donde no obstante las limitaciones en pluviosidad (menos de 700 mm de lluvia al año), especies como *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus camaldulensis* se usan a gran escala en la recuperación de dunas y en el establecimiento de bosques dendroenergéticos (21).

**Peso seco residual (Psr) de las muestras de las tres especies forestales y el café.** El peso seco medio de las muestras remanentes de café a libre exposición, a los 30, 180 y 365 días, fue de 93,0; 60,5 y 34,5 g, respectivamente; para café con sombrío de nogal fue de 89,7; 51,0 y 33,6 g, en café bajo sombrío de pino de 93,0; 49,0 y 36,8 g, y en café con sombrío de eucalipto los valores fueron de 94,0; 62,0 y 30,1 g, respectivamente (Figura 4).



**Figura 4.** Peso seco residual (g) de las muestras vegetales de café a libre exposición y bajo sombrío y de las tres especies forestales en descomposición, durante un período de un año.

En estos períodos de tiempo las muestras remanentes de nogal fueron de 94,3; 60,5 y 41,5 g, respectivamente; las de pino de 98,7; 78,5 y 74,6 g, y las de eucalipto de 98,3; 63,0 y 42,1 g. El peso seco de la muestra inicial fue de 100 g en todas las especies. En descomposición de residuos de *Pinus pinaster*, *P. nigra*, *Adenocarpus decorticans* y *Cistus laurifolius*, Moro y Domingo (45) registraron pesos secos de 80 y 90 g en las muestras remanentes a los 180 y 360 días en las especies de pino, y entre 50 y 80 g a los 180 días y 25 y 60 g a los 360 días, en las otras dos especies.

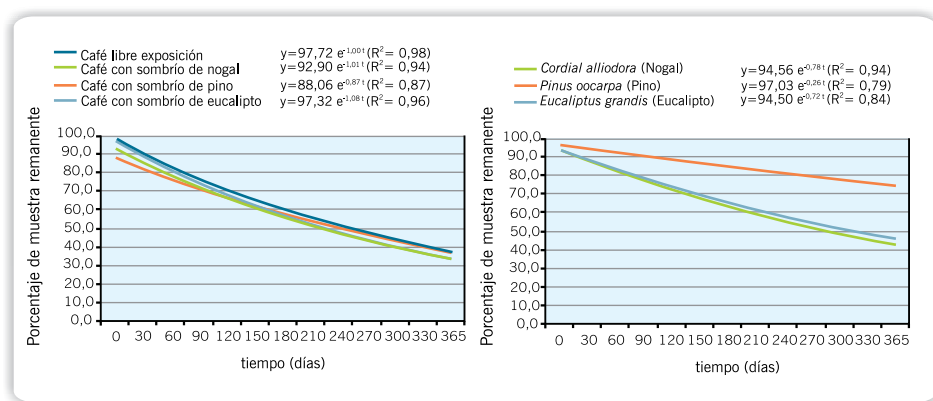
Lusk *et al.* (40) reportan valores de pesos secos remanentes de 60 g en *P. radiata*, en un período de cinco meses, y Callahan *et al.* (6), en *Pinus* sp. obtuvieron pesos remanentes de 85 y 75 g a los 200 y 300 días de descomposición de los residuos. White *et al.* (71) y Sariyildiz (57), reportan pesos remanentes en la muestras de *Pinus* sp. de 55 g a los 360 días y de 75 y 60 g a los 180 y 360 días de descomposición de *P. sylvestris*. Singh *et al.* (62), después de 365 días de descomposición de residuos de *Azdirachta indica*, *Dalbergia sissoo*, *Pongamia pinnata* y *Shorea robusta*, obtuvieron porcentajes de masa remanentes de 27,2%, 31,9%, 41,2% y 52,9%, respectivamente.

**Descomposición de la hojarasca.** En la Tabla 3 y la Figura 5, se presenta de acuerdo al modelo aplicado (exponencial simple), la tasa relativa de descomposición ( $k$ ) para el café a libre exposición solar y bajo sombrío, así como de nogal, pino y eucalipto. Modelos similares fueron aplicados por Heuvelodop *et al.* (29) en *C. alliodora*, por Gama-Rodrigues *et al.* (22) en *Peltogyne angustiflora*, *Centrolobium robustum*, *Arapatiella psilophylla*, *Sclerolobium chrysophyllum*, *C. trichotoma* y *Macrolobium latifolium*, por Prause y Lifschitz (52) en *Gleditsia amorphoides*, *Patagonula americana*, *Chlorophora tinctoria* y *Astronium balansae*, y por Munguía *et al.* (46) en *Eucalyptus deglupta*, *Erythrina poeppigiana* y café, entre otros.

**Tabla 3.** Valores estimados de la tasa de descomposición mensual del follaje de café a libre exposición solar y bajo sombrío y de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*.

Tratamientos	Tasa de descomposición de residuos	
	K.año <sup>-1</sup>	c.v.
Café a libre exposición	1,00 a	0,04
Café con sombrío de nogal	1,01 a	0,37
Café con sombrío de pino	0,87 a	0,12
Café con sombrío de eucalipto	1,08 a	0,22
<i>C. alliodora</i> (nogal)	0,78 a	0,11
<i>P. oocarpa</i> (pino)	0,26 b	0,03
<i>E. grandis</i> (eucalipto)	0,72 a	0,15

k: Tasa de descomposición anual; c.v. Coeficiente de variación



**Figura 5.** Porcentaje de masa remanente del follaje de café a libre exposición solar y bajo sombrío de especies forestales, de *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*.

El análisis de varianza y a las pruebas de comparación (Tukey al 5%), no mostraron diferencias estadísticas entre la tasa de descomposición anual para el café a libre exposición solar y bajo sombrío; tampoco fue evidente esta diferencia en la tasa de descomposición de los residuos de nogal y eucalipto. Hubo diferencia estadística entre la tasa de descomposición de los residuos vegetales de pino y el café bajo todos sus ambientes, y nogal y eucalipto, es decir, que los residuos vegetales de pino se descomponen mas lentamente que el resto de los materiales.

El promedio de la tasa de descomposición ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) de los residuos vegetales del café a libre exposición y bajo sombrío fue de 0,99; la de nogal de 1,08 y la de pino y eucalipto de 0,26 y 0,72 respectivamente. La tasa de descomposición reportada por Ribeiro *et al.*

(54), en *E. globulus* oscila entre 0,37 y 0,42; y en *E. Globulus*, Guo y Sims (25) encontraron tasas de descomposición medias de 0,01 y 1,34. En otras especies como *Metrosideros polymorpha*, Austin y Vitousek (3), obtuvieron que la tasa de descomposición ( $k$ ) fluctuó entre 0,22 y 1,06. Moro y Domingo (45) registraron valores de  $k$  de 0,13 y 0,16 en *P. pinaster* y *P. Nigra*, y en *C. trichotona*, Gamma-Rodrigres (22) fijó un  $k$  de 1,2. Al ajustar modelos exponenciales en la tasa de descomposición de 51 especies arbóreas, Simmons y Hawkins (61) encontraron que la  $k \cdot \text{año}^{-1}$  fluctuaba entre 0,002 y 0,45. Esta variación en la tasa de descomposición, de acuerdo con Berg (4), y la cual puede decrecer 0,1% a 0,00001% por día, puede deberse a la composición química del material vegetal o calidad del sustrato.

Santa (55) reportó índices de descomposición ( $k \cdot \text{mes}^{-1}$ ) en *P. pinea* y *P. pinaster* de -0,15 y -0,08 y Kwabiah *et al.* (33), aplicando modelos exponenciales simples, en descomposición de residuos de *Croton megalocarpus*, *Sesbania sesban* y *Calliandra calothyrsus*, obtuvieron coeficientes de descomposición de 0,037, 0,042 y 0,012, respectivamente.

**Coefficiente Isohúmico ( $k_1$ ).** Las pruebas de comparación realizadas (Tukey 5%) entre los coeficientes Isohúmicos ( $k_1$ ) de café a libre exposición solar y bajo sombrío, no evidenciaron diferencia estadística, lo que indica que la fracción no descompuesta del material vegetal del café no es determinada por el tipo de sombrío; el  $k_1$  en un período de un año de evaluación fue de 0,37 para el café a libre exposición solar y bajo sombrío (Tabla 4).

La fracción no descompuesta para *C. alliodora* fue del 46%, la cual no fue estadísticamente diferente de la estimada en *E. grandis* (49%), estas dos presentaron diferencia estadística (prueba Tukey 5%) al compararse con la de *P. oocarpa* (77%). Ribeiro *et al.* (54) observaron que *E. globulus* después de 645 días de descomposición, conservaba el 52,8% del material inicial; Fasbender (17) determinó que la fracción no descompuesta en residuos de *C. alliodora*, en un período de 300 días, fue del 50,8%, y Arguello (2) indica que al finalizar la semana 12 de descomposición de residuos de especies como *Erythrina* sp., ésta conservaba más del 61% del peso inicial sin descomponer.

**Tabla 4.** Coeficiente isohúmico de los residuos de café a libre exposición solar, café bajo sombrío y de las tres especies forestales.

Tratamientos	Coefficiente Isohúmico ( $k_1$ )	c.v.
Café a libre exposición	0,37 <b>a</b>	0,13
Café con sombrío de nogal	0,36 <b>a</b>	0,42
Café con sombrío de pino	0,42 <b>a</b>	0,14
Café con sombrío de eucalipto	0,34 <b>a</b>	0,17
<i>Cordia alliodora</i> (nogal)	0,46 <b>a</b>	0,14
<i>Pinus oocarpa</i> (pino)	0,77 <b>b</b>	0,01
<i>Eucalyptus grandis</i> (eucalipto)	0,49 <b>a</b>	0,16

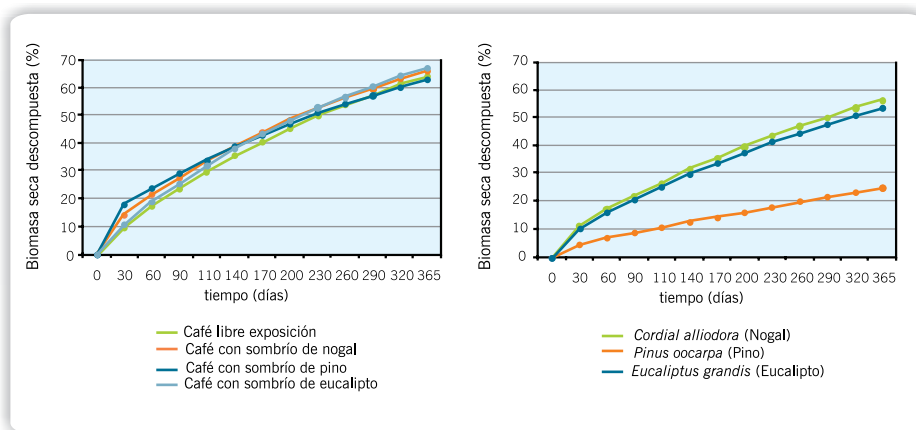
c.v.: Coeficiente de variación

**Tasa de incorporación de residuos vegetales.** En la Figura 6, se presentan los porcentajes de transferencia o incorporación mensual al suelo de residuos vegetales descompuestos, basados en los modelos ajustados y de acuerdo con las condiciones climáticas de la localidad.

En los primeros 30 días de descomposición del material vegetal aportado por el café a libre exposición solar ( $4,94 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) y bajo sombrío ( $4,15 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) se incorporó al suelo el 9,8% y el 14,3%. La incorporación del 50% de los residuos vegetales se registró a los 240 días de descomposición y a los 365 días se degradó e incorporó al suelo el 64,1% y el 65,4% de la materia orgánica producida por el café a libre exposición solar y bajo sombrío, respectivamente.

Del material vegetal aportado por el nogal ( $3,46 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ), el pino ( $6,67 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) y el eucalipto ( $6,39 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ), en los primeros 30 días de descomposición se incorporó al suelo el 11,2%, el 5,0% y el 10,8%, respectivamente. La incorporación del 50% de los residuos vegetales de nogal y el 51% de los residuos de eucalipto se registró entre los 300 y 330 días de descomposición, y a los 365 días se degradó e incorporó al suelo el 56,7%, el 25,2% y el 54,0% de la materia orgánica producida por nogal, pino y eucalipto, respectivamente.

Munguía *et al.* (46), obtuvieron tasas de descomposición del 23% a los 213 días en *E. deglupta* y del 60% en 213 días en *Coffea arabica*. En *P. radiata*, Ganjegunte *et al.* (23) obtuvieron tasas de descomposición del follaje del 24% anual, y le atribuyeron a compuestos polifenólicos y a las grandes concentraciones de lignina, la baja tasa de descomposición. Santa (55), en *Quercus rotundifolia*, *P. pinea* y *P. pinaster*, registró que cerca del 30% de la materia seca se descompone durante los primeros 4 meses. Hartemink y O'Sullivan (26) en *Piper aduncum*, *Gliciridia sepium* e *Imperata cylindrica* encontraron que la tasa de descomposición fue del 50% en las diez primeras semanas. Ribeiro *et al.* (54) obtuvieron que la descomposición de *E. globulus* fue del 47,2% en 645 días. Moro



**Figura 6.** Porcentajes de la biomasa inicial descompuesta e incorporada al suelo mensualmente.



y Domingo (45) registraron porcentajes de descomposición del 14,0% en 360 días en *P. pinaster* y *P. Nigra*, y el tiempo de descomposición total puede fijarse en 4 a 5 años; y Gama-Rodrigues *et al.* (22), encontraron que en un año se descompuso e incorporó al suelo el 60% de los residuos de *C. tricotoma*.

Prause y Lifschitz (52), afirman que las hojas de las distintas especies forestales se descomponen a diferentes velocidades en un proceso rápido al comienzo, con registros de pérdidas de peso entre 28% y 60% del peso total del material vegetal, en los primeros tres meses. En un bosque compuesto por *Acacia polyphylla*, *Alchornea triplinervia*, *Aspidosperma polyneuron*, *Bastardiopsis densiflora*, *Cordia trichotoma*, *Gallesia integrifolia*, *Luehea divaricata* y *Machaerium brasiliense*, entre otros, Tundis *et al.* (69) encontraron que el coeficiente de descomposición ( $k$ ) fue de 1,71 y que el tiempo necesario para la descomposición era del 50% y 95%, después de 150 y 639 días, respectivamente.

**Descomposición de residuos vs. Índice de humedad del suelo (IHS).** La influencia de la humedad del suelo sobre la proporción de la biomasa seca descompuesta mensualmente, entre agosto de 2001 y julio de 2002, se presenta en la Tabla 5.

El coeficiente de correlación ( $r$ ) entre el IHS y el porcentaje de la materia seca que se descompone cada mes en café a libre exposición solar fue de -0,18, en café bajo sombrío de 0,05, en nogal y pino de 0,31 y en eucalipto de 0,21, pero los análisis de varianza no indicaron relación alguna entre estas dos variables ( $>0,05$  en todos los casos), lo que indica que la disponibilidad o no de agua en el suelo no tuvo influencia sobre la descomposición de la masa vegetal, en las condiciones ambientales y de suelos donde se desarrolló el estudio. No obstante, algunos autores sostienen que el clima modifica notablemente la rapidez de la descomposición de los residuos vegetales en la superficie del suelo, ejerciendo influencia sobre el tipo y abundancia de la materia orgánica (5, 32). La humedad y la temperatura se encuentran entre las variables más determinantes,

**Tabla 5.** Relación entre la humedad del suelo sobre el porcentaje mensual de biomasa seca descompuesta, entre agosto de 2001 y julio de 2002.

Especies	Índice de Humedad del Suelo (IHS)												$r$
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
	0,20*	0,96	1,00	0,92	1,00	0,74	0,24	1,00	1,00	0,91	0,63	0,64	
Porcentaje de la biomasa descompuesta mensualmente													
Café al sol	6,7	11,8	12,9	1,5	-3,2	9,8	7,5	0,0	7,9	0,5	5,0	5,2	-0,18
Café/ sombra	7,9	11,6	16,6	2,3	3,5	4,1	2,8	-1,0	5,5	1,8	8,2	3,2	0,05
Nogal	5,7	10,4	12,0	7,8	-2,4	6,0	-3,5	3,0	7,1	1,2	7,9	3,4	0,31
Pino	1,3	1,5	10,2	3,2	-1,1	6,3	-5,0	-1,5	2,3	1,3	6,0	1,0	0,31
Eucalipto	1,8	8,6	27,6	-8,2	4,2	3,1	0,5	-4,5	6,5	5,6	5,6	7,3	0,21

porque influyen en el desarrollo de la vegetación y en la actividad de los microorganismos.

Bunvong y Granger (5) citan que la intensidad máxima de la descomposición de la materia orgánica se observa en condiciones de temperatura moderada (alrededor de 30°C) y con un contenido de humedad del suelo alrededor del 60-80% de su capacidad máxima de retención de agua. En otros estudios McTiernan (42) en *P. sylvestris*, y Liski *et al.* (36) en *Pinus* sp., observaron que la tasa de descomposición de los residuos vegetales presentaba una correlación positiva con la humedad relativa, la evapotranspiración, la precipitación y la temperatura. Guo y Sims (25), observaron que la tasa de descomposición de residuos vegetales de *E. globulus*, presentaba una correlación positiva con factores como la precipitación, la temperatura y la radiación solar.

Camiré *et al.* (7) y Simmons y Hawkins (61), en la evaluación de 51 especies arbóreas, encontraron correlaciones positivas entre la tasa de descomposición y los factores climáticos, temperatura y precipitación; y Austin y Vitousek (3) observaron que la precipitación tiene una correlación positiva con la tasa de descomposición de residuos vegetales de *Metrosideros polymorpha*. Dora *et al.* (15), en *Peltogyne gracilipes*, obtuvieron relaciones inversas entre la tasa de descomposición y la distribución de lluvias. Thaitusa y Granger (68) aplicaron regresiones lineales simples para relacionar la descomposición de la hojarasca en bosques tropicales y variables climáticas, de éstas obtuvieron que los porcentajes de descomposición aumentan con la precipitación y la humedad relativa, y que la temperatura no tenía influencia sobre la tasa de descomposición.

Pero la tasa de descomposición no depende solo de los factores ambientales como la temperatura, la humedad y la precipitación y de las características del suelo, de su humedad y de las poblaciones microbianas (13, 16); las diferencias en descomposición de los materiales vegetales están en función de la composición química, de las concentraciones de los nutrientes y de la relación C:N (31, 48). Sariyildiz (57) indica que la concentración de N y la relación C:N se han identificado como los factores más importantes que controlan los procesos de descomposición de la materia orgánica.

**Relación Carbono:Nitrógeno (C:N).** La relación C:N depende de las especies y la edad de las mismas, y es un buen indicador de la susceptibilidad de la hojarasca a ser degradada. El rango óptimo en los residuos orgánicos se encuentra entre 25-30:1; si el residuo de partida es rico en C y pobre en N, la descomposición será lenta, pero por el contrario, con altas concentraciones de N, éste se transformará en amoníaco, impidiendo la correcta actividad biológica. Si el material final obtenido tras la descomposición tiene un valor C:N alto (>35), indica que no ha sufrido una descomposición completa y si el índice es muy bajo (<25), puede ser por una excesiva mineralización, aunque todo ello depende de las características del material inicial (13, 17, 48). En la Tabla 6, se presentan las concentraciones iniciales y finales de C orgánico y N, y la relación C:N del café a libre exposición solar y bajo sombrío, y de las tres especies forestales.

La relación C:N inicial en el café a libre exposición solar fue de 32,2 y la final de 19,8 a los 365 días de descomposición del material vegetal. Estas relaciones de café bajo sombrío fueron de 24,9 y 16,9 respectivamente. Los coeficientes de correlación entre el tiempo de descomposición de la biomasa seca del café en los dos sistemas de cultivo (libre exposición

**Tabla 6.** Concentración inicial (Ci) y final (Cf) de carbono orgánico (CO), nitrógeno (N) y la relación C:N del material remanente del café a libre exposición solar, café con sombrío, y de las especies forestales nogal, pino y eucalipto.

Especies	CO (%)			N (%)			C:N		
	Ci	Cf	r	Ci	Cf	r	Inicial	Final	r
Café solo	53,4	49,5	-0,49	1,7	2,5	0,68	32,2	19,8	-0,69
Café con sombrío	53,3	50,1	-0,85	2,1	3,0	0,75	24,9	16,9	-0,80
<i>C. alliodora</i>	47,1	42,5	-0,75	2,0	2,4	0,06	23,8	18,1	-0,43
<i>P. oocarpa</i>	55,7	55,4	-0,38	0,5	0,8	0,48	105,1	73,9	-0,38
<i>E. grandis</i>	55,2	52,6	-0,88	0,8	1,4	0,91	71,7	37,3	-0,90

solar y bajo sombra), fueron de -0,69 en el primer caso y de -0,80 en el segundo, indicando una relación inversa entre estas dos variables, es decir, que la relación C:N disminuye al incrementarse el tiempo de descomposición de los residuos del café.

Las relaciones C:N iniciales en los residuos de *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis* fueron de 23,8; 105,1 y 71,7 y las relaciones C:N finales (a los 365 días de descomposición de la biomasa seca) de 18,1; 76,9 y 37,3 respectivamente. Los coeficientes de correlación entre el tiempo de descomposición de la materia seca fueron de -0,43 en nogal, de -0,38 en pino y de -0,90 en eucalipto, indicando una relación inversa entre estas dos variables, es decir, que la relación C:N disminuye al incrementarse el tiempo de descomposición de los residuos vegetales. La alta relación C:N, estimada para el *P. oocarpa*, indica una lenta descomposición de sus residuos vegetales. Gama-Rodrigues *et al.* (22) reportan relaciones C:N de 27,3 para *C. tricotoma*, y Sariyildiz (57) indican relaciones de 5,3 para *P. sylvestris*; sin embargo, White *et al.* (71) encontraron en *P. rigida*, relaciones iniciales C:N de 95,0 y finales (863 días) de 0,39.

XU *et al.* (73) obtuvieron correlaciones positivas entre la masa remanente y las relaciones C:N y C:P, después de dos años de descomposición de residuos de *Castanopsis sieboldii* y *Schima wallichii*; Moro y Domingo (45) y Corbeels (11), afirman que la descomposición de residuos vegetales de *P. pinaster* y *P. nigra*, después de dos años, correlaciona positivamente con la relación C:N inicial. Por lo general, el índice de descomposición es más alto en las especies que tienen un máximo de ceniza y de nitrógeno, y una mínima relación C:N y de lignina (5).

**Concentraciones iniciales y finales de nutrientes.** Las concentraciones iniciales (0 días) y las finales (365 días) de N, P, K, Ca y Mg, en las muestras remanentes de café a libre exposición y bajo sombrío, y de las tres especies forestales, se presentan en la Tabla 7.

***Coffea arabica.*** En café a libre exposición solar las concentraciones iniciales de N, P, K, Ca y Mg fueron de 2,82%, 0,19%, 1,23% 1,70% y 0,33% y las finales de 2,82%, 0,11%, 0,14% 3,0% y 0,35%, respectivamente; y los *r* entre el tiempo de descomposición y las concentraciones de nutrientes fueron de -0,40; 0,20; 0,81; -0,81 y -0,41, lo que

**Tabla 7.** Concentración (%) de nutrientes en las muestras inicial y remanente de residuos vegetales de café a libre exposición solar y bajo sombrero y de *C. alliodora*, *P. occarpa* y *E. grandis*.

Tto	N (%)			P (%)			K (%)			Ca (%)			Mg (%)		
	C <sub>i</sub>	C <sub>f</sub>	r	C <sub>i</sub>	C <sub>f</sub>	r	C <sub>i</sub>	C <sub>f</sub>	R	C <sub>i</sub>	C <sub>f</sub>	r	C <sub>i</sub>	C <sub>f</sub>	r
CLE	2,81	2,82	-0,49	0,19	0,11	0,20	1,23	0,14	0,81	1,70	3,00	-0,81	0,33	0,35	-0,41
CSN	2,87	3,30	-0,78	0,25	0,10	0,57	1,29	0,15	0,85	1,76	4,33	-0,92	0,39	0,51	-0,76
CSP	2,79	2,87	-0,38	0,17	0,10	0,42	1,21	0,08	0,96	1,68	3,13	-0,96	0,31	0,33	0,08
CSE	2,84	2,80	-0,53	0,22	0,10	0,36	1,26	0,12	0,85	1,73	2,93	-0,81	0,36	0,33	0,33
NOG	1,44	2,32	-0,87	0,07	0,11	-0,42	0,80	0,12♦	0,87	5,50	6,10	-0,62	0,80	0,62	0,48
PIN	0,48	0,67	-0,61	0,02	0,03	-0,76	0,18	0,08	0,45	0,45	0,63	-0,74	0,06	0,11	-0,80
EUC	0,78	1,42	-0,84	0,05	0,08	-0,69	0,59	0,15	0,90	1,07	1,82	-0,71	0,14	0,20	-0,66

CLE: Café libre exposición solar; CSN: Café con sombrero de nogal; CSP: Café con sombrero de pino; CSE: Café con sombrero de eucalipto; NOG; Nogal; PIN: Pino; EUC: Eucalipto

♦Se registraron valores menores a la concentración final.

indica que las concentraciones de N, Ca y Mg aumentan y las de P y K disminuyen, al reducirse el porcentaje de material vegetal remanente. Las concentraciones medias iniciales y finales de N, P, K, Ca y Mg del café bajo los tres sistemas de sombrero tuvieron el mismo comportamiento que a libre exposición solar. Las concentraciones iniciales de N, P, K, Ca y Mg fueron de 1,44%, 0,07%, 0,8%, 5,50% y 0,80%, respectivamente y las finales de 2,32%, 0,11%, 0,12%, 6,10% y 0,62%. Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de nutrientes fueron -0,87; -0,42; 0,87; -0,62 y 0,48, e indican que las concentraciones N, P y Ca aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal remanente y las de K y Mg disminuyen. Gama-Rodrigues *et al.* (22), obtuvieron relaciones similares entre la concentración de N y el porcentaje de muestra remanente, en la descomposición del material vegetal de *C. trichotoma*.

***Pinus oocarpa*.** Las concentraciones iniciales de N, P, K, Ca y Mg fueron de 0,48%, 0,02%, 0,18%, 0,45% y 0,06%, respectivamente y las finales de 0,67%; 0,03%; 0,08%, 0,63% y 0,11%. Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos elementos, con valores de -0,61; 0,54; 0,45; -0,74 y -0,80, indican que las concentraciones N, Ca y Mg aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal restante, mientras que las concentraciones de P y K disminuyen.

McTiernan (42) en *Pinus sylvestris*, Santa (39) en *P. pinea*, *P. pinaster* y *P. nigra*, Moro y Domingo (45) en *P. pinaster* y *P. nigra*, White *et al.* (71) en *P. rigida*, Zhi-an Li *et al.* (75) en *Acacia mangium*, *A. auriculaeformis*, *Eucalyptus citriodora*, *P. ellioti* y *Schima superba*, y Montagnini *et al.* (44) en *Stryphnodendron excelsum*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia hondurensis* y *Hyeronima alchorneoides*, observaron que las concentraciones de N presentaban una correlación inversa con el porcentaje de la masa residual, en la descomposición de estos materiales vegetales.

***Eucalyptus grandis*.** En eucalipto las concentraciones iniciales de N, P, K, Ca y Mg fueron de 1,42%, 0,08%, 0,15%, 1,07% y 0,14%, respectivamente y las finales de 1,42%, 0,08%, 0,15%, 1,82% y 0,20% para los mismos elementos. Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de muestra residual y las concentraciones de estos nutrientes (-0,84; -0,69; 0,90; -0,71 y -0,66), indican que las concentraciones N, P, Ca y Mg aumentan al disminuir el porcentaje de material vegetal remanente y que las concentraciones de K disminuyen al reducirse este porcentaje.

Se han encontrado relaciones inversas entre la masa vegetal residual y las concentraciones de N, y relaciones directas con las concentraciones de P, K y Ca en la descomposición de residuos de *E. globulus* y *Metrosideros polymorpha* (3, 54). Montagnini *et al.* (44) en la descomposición de residuos de *Stryphnodendron excelsum*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia hondurensis* y *Hyeronima alchorneoides*, observaron que en las dos especies de *Vochysia* la concentración de P aumentó y en *Stryphnodendron excelsum* y en *Hyeronima alchorneoides* disminuyó al descomponerse el material vegetal. Ribeiro *et al.* (54) no obtuvieron correlaciones entre la muestra residual mensual y la concentración de Mg en descomposición de residuos de *Eucalyptus globulus*, y Dora *et al.* (15), en *Peltogyne gracilipes*, obtuvieron correlaciones positivas entre la tasa de descomposición y las concentraciones de Mg.

**Liberación de nutrientes.** La dinámica en la transferencia de nutrientes ( $k$ ), a los 365 días de descomposición de la hojarasca del café a libre exposición y bajo sombrío, y de las tres especies forestales, se presenta en la Tabla 8 y la Figura 7.

**Nitrógeno.** La transferencia de N del café bajo sombrío de eucalipto fue mayor que la de café bajo sombrío de nogal; la liberación de N por los residuos de café a libre exposición solar fue igual a la tasa de transferencia del café bajo las diferentes especies de sombrío. La dinámica en la transferencia de N fue igual en *C. alliodora* y *E. grandis* y hubo inmovilización del N en *P. oocarpa*. La hojarasca de café transfiere N a una tasa más alta que la transferida por la hojarasca de las especies forestales. Munguía (46), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de N en *E. deglupta* y *C. arabica* de 0,06 y 0,034.

**Fósforo.** No hubo diferencias estadísticas en cuanto a la liberación de P por la hojarasca del café en descomposición, en los cuatro sistemas de cultivo. *C. alliodora* transfiere P a una tasa más alta que *P. oocarpa*, mientras que se presenta inmovilización de este nutriente en *E. grandis*. Las tasas de liberación de P fueron mayores en café a libre exposición solar y bajo sombrío de eucalipto, que las tasas de transferencia de la hojarasca de *C. alliodora* y *P. oocarpa*. Munguía (46), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de P en *E. deglupta* y *C. arabica* de 0,12 y -0,035.

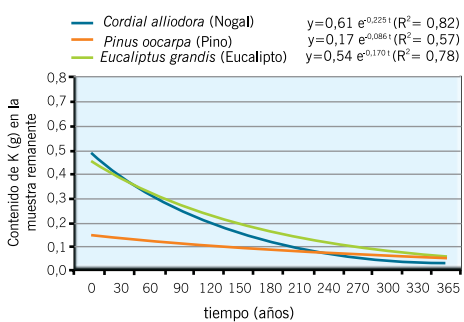
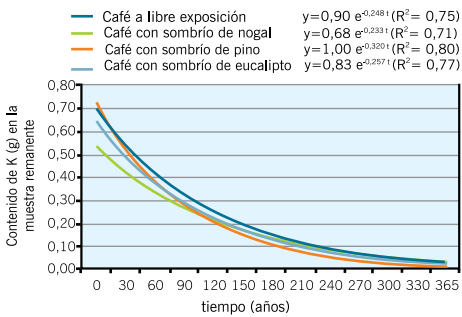
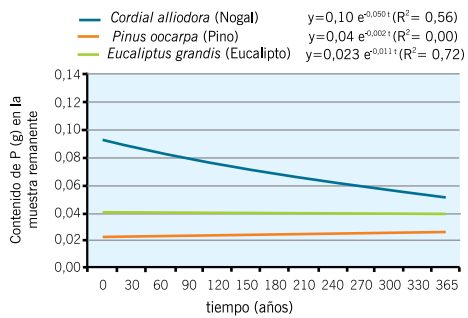
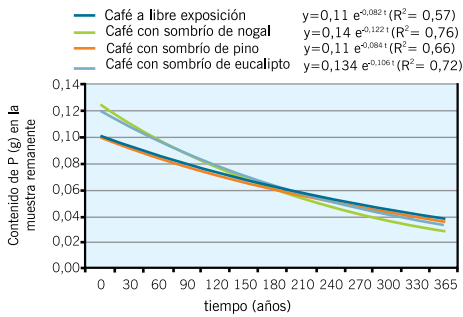
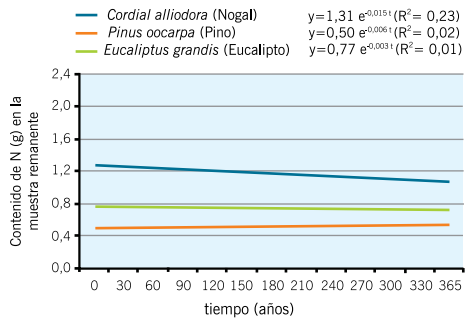
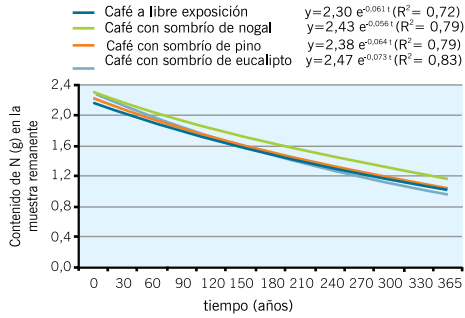
**Tabla 8.** Tasas de transferencia de nutrientes ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ), a los 365 días de descomposición de la hojarasca del café a libre exposición solar, café bajo sombrío, y de las tres especies forestales.

Especies	Tasa de liberación de nutrientes ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ )					$p$
	N	P	K	Ca	Mg	
Café a libre exposición	-0,061 <b>ab</b> ♦	-0,082 <b>ab</b>	-0,248 <b>ab</b>	-0,020 <b>bc</b>	-0,054 <b>bcd</b>	*
Café con sombrío de nogal	-0,056 <b>b</b>	-0,122 <b>a</b>	-0,233 <b>ab</b>	-0,003 <b>d</b>	-0,049 <b>cd</b>	*
Café con sombrío de pino	-0,064 <b>ab</b>	-0,084 <b>ab</b>	-0,320 <b>a</b>	-0,022 <b>b</b>	-0,087 <b>abc</b>	*
Café con sombrío de eucalipto	-0,073 <b>a</b>	-0,106 <b>a</b>	-0,257 <b>ab</b>	-0,045 <b>a</b>	-0,111 <b>a</b>	*
<i>Cordia alliodora</i> (Nogal)	-0,015 <b>c</b>	-0,050 <b>b</b>	-0,225 <b>ab</b>	-0,039 <b>a</b>	-0,091 <b>ab</b>	*
<i>Pinus oocarpa</i> (Pino)	0,006 <b>d</b> +	-0,002 <b>c</b>	-0,086 <b>c</b>	-0,003 <b>d</b>	0,014 <b>e</b>	*
<i>Eucalyptus grandis</i> (Eucalipto)	-0,003 <b>cd</b>	0,011 <b>c</b>	-0,170 <b>bc</b>	-0,006 <b>cd</b>	-0,026 <b>d</b>	*

+ Valores positivos indican inmovilización del nutriente

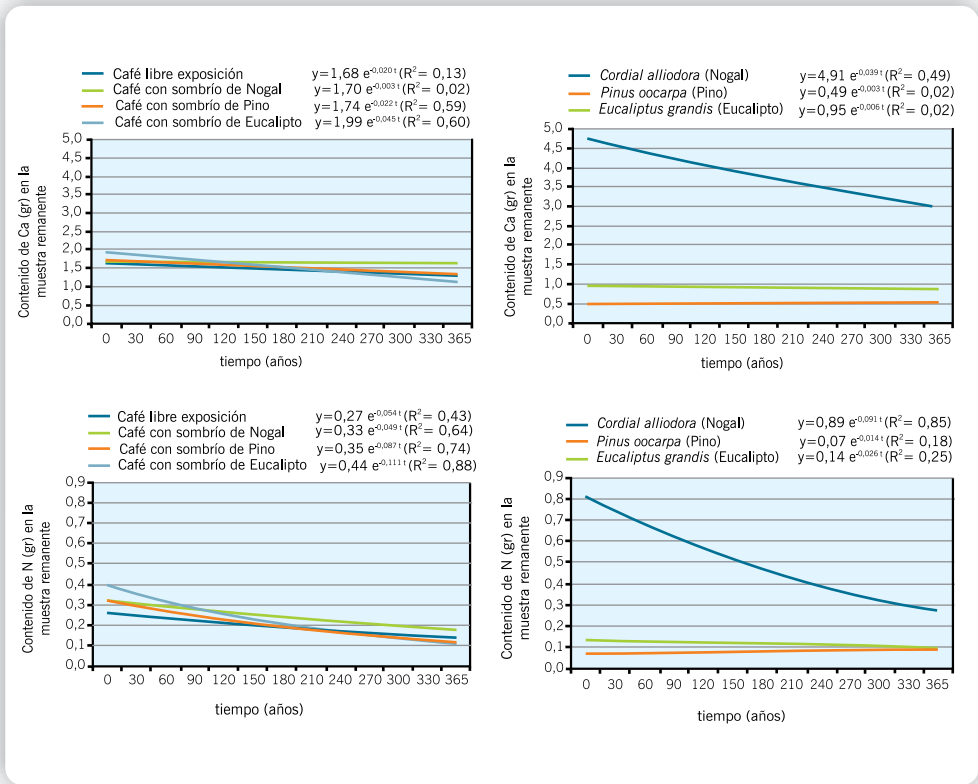
♦ Valores de  $k$  seguidos por letra distinta en la misma columna indican diferencia estadística según prueba Tukey 5%

\* <0,001 en todos los casos



Continúa...

... Continuación



**Figura 7.** Dinámica en la transferencia de N, P, K, Ca y Mg ( $k \cdot \text{año}^{-1}$ ) por el café, en cuatro sistemas de cultivo, y por las tres especies forestales, en la Subestación Experimental Paraguaicito.

**Potasio.** No hubo inmovilización de K en café bajo sus diferentes sistemas de cultivo, ni en las especies forestales. Las tasas de liberación de K fueron iguales en la hojarasca del café (bajo sombra y a libre exposición) al compararlas con las de *C. alliodora*. Las tasas de liberación de K de la hojarasca producida por *P. oocarpa* y *E. grandis* fueron iguales, y presentaron diferencias con respecto a las de café y nogal. Munguía (46), obtuvo tasas de liberación ( $k \cdot \text{día}^{-1}$ ) de K en *E. deglupta* y *C. arabica* de -0,49 y -0,56, respectivamente.

**Calcio.** Las mayores tasas de liberación de Ca se presentaron en la hojarasca de *C. alliodora* y en la de café bajo sombrío de eucalipto; no obstante, a pesar de que el café y las especies forestales no presentaron inmovilización de Ca, las tasas más bajas de liberación de este nutriente se registraron en la hojarasca de café bajo sombrío de nogal, en pino y eucalipto.



**Magnesio.** Los residuos de café bajo sombrío de eucalipto presentaron una tasa de liberación de Mg más alta que la hojarasca del café bajo sombrío de nogal y a libre exposición solar. Entre las especies forestales la tasa de transferencia más baja fue en *E. grandis* al compararse con *C. alliodora*, mientras que en *P. oocarpa* se presentó inmovilización de este nutrimento.

De este estudio pudo establecerse que

- La producción media de biomasa seca en café fue de 4,35 t.ha<sup>-1</sup>, en *C. alliodora* de 3,46 t.ha<sup>-1</sup>, en *P. oocarpa* de 6,67 t.ha<sup>-1</sup> y en *E. grandis* de 6,39 t.ha<sup>-1</sup>.
- El modelo que mejor representó la tasa de descomposición de los residuos vegetales fue el exponencial simple.
- La tasa relativa de descomposición mensual (**k**) en café a libre exposición solar fue de 1,0; en café bajo sombrío fluctuó entre 0,87 y 1,08; en *C. alliodora* fue de 0,78; en *P. oocarpa* de 0,26 y en *E. grandis* de 0,72.
- El sistema de cultivo de café, libre exposición solar o bajo sombrío, no afecta la tasa de descomposición de sus residuos vegetales.
- Los residuos vegetales de *P. oocarpa* se descomponen más lentamente ( $k=0,20$ ) que los residuos de *C. alliodora* y *E. grandis*.
- En un período de 365 días se descompone e incorpora al suelo el 65,1% de los residuos producidos por café, el 56,7% de los producidos por *C. alliodora*, el 25,2% de los producidos por *P. oocarpa* y el 54,0% de los producidos por *E. grandis*.
- La fracción de la materia orgánica no descompuesta (**k<sub>1</sub>**) en un período de 365 días fluctuó entre el 34% y el 42% en café bajo sus diferentes sistemas de cultivo; en *C. alliodora* fue del 46%, en *P. oocarpa* del 77% y en *E. grandis* del 49%.
- La disponibilidad o no de agua en el suelo no tiene influencia sobre la descomposición de la masa vegetal en estos sistemas agroforestales.
- En un período de 365 días de descomposición, la biomasa seca producida por el café transfiere al suelo el 64,8% del N, el 82,9% del P, el 96,7% del K, el 34,3% del Ca y el 63,1% del Mg, contenido en los residuos vegetales.
- En este mismo período, la descomposición de los residuos vegetales producidos por *C. alliodora*, transfiere al suelo el 33,3% del N, el 54,4% del P, el 93,6 del K, el 54,0% del Ca y el 67,7% del Mg contenido en estos residuos.
- Al finalizar los 365 días, los residuos vegetales producidos por *P. oocarpa*, no transfirieron al suelo N, P, Ca y Mg, solamente liberaron el 64,5% del K presente en los residuos.
- En un período de 365 días de descomposición, la biomasa seca producida por *E. grandis* transfiere al suelo el 23,6% del N, el 35,5% del P, el 89,3% del K, el 28,5% del Ca y el 39,9% del Mg contenido en los residuos vegetales.

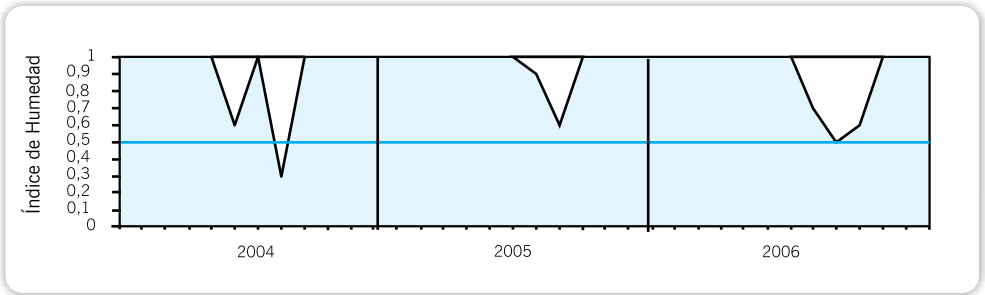
- **Aporte de hojarasca y contenido de nutrientes de *Eucalyptus grandis*, *Pinus chiapensis*, *Pinus tecunumanii* e *Inga densiflora*, empleadas como sombrío en café (*Coffea arabica*).**

**Descripción del sitio de estudio.** El estudio se realizó en la finca La Suecia, ubicada en el municipio de El Tambo, departamento del Cauca, zona cafetera sur de Colombia y bajo la coordinación de la Subestación Experimental El Tambo. Las características geográficas, climáticas (5, 9, 11) y de suelos (20) se presentan en la Tabla 9.

**Índice de Humedad del Suelo (IHS).** El Índice de humedad del suelo para el sitio de estudio en El Tambo (Cauca), se presenta en la Figura 8; el IHS es la relación entre la Evapotranspiración real y la Potencial, estimadas a partir de un balance hídrico (30). La región sur de la zona cafetera colombiana presenta una estación seca desde mediados de junio a mediados de septiembre y una estación lluviosa de octubre a junio. La distribución de la cantidad de lluvia en esta región se registra de la siguiente manera: 45% en el

**Tabla 9.** Características climáticas y de suelos de la localidad.

Localización geográfica		Características de suelos	
Latitud	2° 29' Norte	pH	5,0
Longitud	76° 50' Oeste	Materia Orgánica (%)	16,2
Altitud (m)	1.693	Nitrógeno (%)	0,6
Características climáticas		Fósforo (ppm)	1,0
		Potasio (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,20
Temperatura (°C)	19,6	Calcio (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,5
Precipitación (mm)	1.885	Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,3
Brillo Solar (horas año)	1.545	Ecotopo	112B
Humedad Relativa (%)	78,2	Unidad Cartográfica	
		Grupo taxonómico	Melanudands
		Material Parental	Cenizas Volcánicas



**Figura 8.** Índice de humedad del suelo (IHS), período 2004 a 2006, en la finca La Suecia (Cauca). Registros por debajo de la línea roja, indican deficiencias hídricas en el suelo.

primer semestre y 55% en el segundo del año (30), este patrón de distribución de lluvias se presenta en la zona de ubicación de la finca La Suecia. Los años 2004 y 2006 se caracterizaron por presentar un período seco entre julio y agosto, sin que llegaran a presentarse deficiencias hídricas severas.

**Material vegetal.** Se emplearon las especies forestales *Eucalyptus grandis*, *Pinus chiapensis*, *Pinus tecunumanii* e *Inga densiflora* como sombrío del café, *Coffea arabica*. c.v. Colombia

**Tratamientos y diseño experimental.** Los tratamientos consistieron en el establecimiento de (I) café con sombrío de *E. grandis*; (II) Café con sombrío de *P. chiapensis*; (III) Café con sombrío de *P. tecunumanii*; (IV) Café con sombrío de *I. densiflora* y (V) café a libre exposición solar. Se empleó un diseño de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, para un total de 20 unidades experimentales.

Cada unidad experimental contó con 36 árboles de sombrío plantados a 6,0 x 6,0 m; al interior de este arreglo espacial se plantó el café a 1,5 x 1,5 m (4.500 plantas/ha); entre cada bloque se dejaron franjas de 6,0 m de ancho para reducir el efecto de la sombra proyectada por el sombrío de los bloques contiguos. En términos de área, cada parcela ocupó 1.296 m<sup>2</sup>. Los bloques se ubicaron de manera que se maximizaran entre ellos las diferencias topográficas y de uso previo del suelo, mientras se minimizaban las diferencias entre las parcelas que los constituyen.

**Establecimiento.** El estudio se inició en mayo de 1999, con el establecimiento de las especies forestales y la leguminosa, y continuó dos años después con el establecimiento del café, con el objeto de reducir el efecto que sobre el desarrollo inicial del café tendría el crecimiento diferencial en altura, y por ende, en la sombra producida, de las especies de sombrío. Dos semanas después del establecimiento de los árboles, se realizaron inventarios de supervivencia y se repusieron las plántulas faltantes.

**Evaluaciones.** Para evaluar la cantidad de materia orgánica depositada como hojarasca por las diferentes especies de sombra, se instalaron en cada una de las 16 parcelas experimentales con café y sombrío, cinco trampas de follaje de 0,5 m<sup>2</sup> de superficie cada una. Estas trampas se instalaron en la última semana de diciembre de 2003, cuatro años y siete meses después del establecimiento de las especies sombrío. Entre enero de 2004 y diciembre de 2006, se recolectaron mensualmente, todas las hojas encontradas en las trampas de follaje. Las muestras separadas por trampa y especie se secaron al horno, se pesaron y se analizaron para determinar su concentración y contenido de nutrientes.

**Determinación de la concentración y contenido de nutrientes.** Para la determinación de la concentración y el contenido de nutrientes se procedió de igual forma que en el estudio anterior, realizado en la Subestación Experimental Paraguaicito en el Quindío.

**Análisis de la información.** Para determinar la significancia estadística de las diferencias entre aportes de hojarasca, concentración y contenido de nutrientes, se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación Tukey (5%).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Aporte de hojarasca.** En la Tabla 10 se presenta el aporte mensual de hojarasca producida por *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*.

**Primera recolección (2004).** *E. grandis* tuvo sus tasas máximas de aporte de hojarasca en los meses de diciembre y enero, tiempo en el cual aportó el 28,9% (2.287,5 kg.ha<sup>-1</sup>) del total de la hojarasca producida en este año; en el mes de octubre no produjo hojarasca, fenómeno que coincidió con la deficiencia hídrica registrada en el mes de agosto (Figura 9). *P. chiapensis* presentó su mayor producción de biomasa seca entre los meses de agosto y noviembre, lapso en el cual aportó el 49,7% (782,9 kg.ha<sup>-1</sup>) de la biomasa seca total producida en el año, las deficiencias hídricas se presentaron en agosto; en los meses de mayo a junio esta especie de pino no produjo hojarasca, sin embargo, este hecho no tuvo relación con deficiencias hídricas.

Entre julio, agosto y noviembre, *P. tecunumanii* produjo 117,8 kg.ha<sup>-1</sup> de hojarasca, correspondientes al 55,9% del total producido en el año, esta biomasa se observa después de la deficiencia hídrica calculada en agosto. En el mes de mayo se produjo la menor cantidad biomasa, que fue solo del 2,3% (48,8 kg.ha<sup>-1</sup>) del total producido en el año. Al igual que todas las otras especies, *I. densiflora* presentó su mayor cantidad de hojarasca entre los meses de agosto y noviembre, la cual fue del 27,0% (875,2 kg.ha<sup>-1</sup>) de la biomasa seca total producida en este año, mientras que la producción más baja se registró en los meses de febrero y octubre, con un promedio de 62,0 kg.mes<sup>-1</sup>. No obstante el lapso tan corto que presentó la deficiencia hídrica registrada (agosto), ésta parece haber influido en la pérdida de follaje de las especies arbóreas empleadas como sombrío en café.

**Segunda recolección (2005).** En este segundo período de evaluaciones no se evidenciaron deficiencias hídricas en la zona de estudio (Figura 9). *E. grandis* presentó su mayor aporte de hojarasca (2.439,6 kg) en los meses de febrero y abril, lo que equivale al 24,6% del total aportado en el año; en el mes de octubre se registró la menor producción de biomasa seca, solo el 3,4% (340,5 kg.ha<sup>-1</sup>) del total producido en el año. *P. chiapensis* produjo el 33,2% (1.184,1 kg.ha<sup>-1</sup>) de biomasa seca en los meses de julio y septiembre y las producciones más bajas de material vegetal se registraron en el mes de abril y entre los meses de enero a marzo, períodos en los cuales sólo produjo el 8,4% y el 5,5% del material vegetal seco producido en 2005.

*P. tecunumanii* produjo su mayor cantidad de biomasa seca (2.752,5 kg.ha<sup>-1</sup>) equivalente al 34,7% del total, entre los meses de agosto a octubre; mientras que en el mes de mayo (7,7%) y entre los meses de enero a marzo (15,0%) se registraron las producciones más bajas de hojarasca. En el segundo período de evaluación, *I. densiflora* presentó su mayor aporte de hojarasca en los meses de julio y septiembre con el 38,0% (1.984,3 kg.ha<sup>-1</sup>) de la biomasa total producida en el año. En marzo se produjo la menor cantidad de material vegetal, que fue solo del 4,8%.

**Tercera recolección (2006).** *E. grandis* presentó sus tasas máximas de aporte de hojarasca en los meses de enero y marzo, tiempo en el cual aportó el 27,4% (2.575,8 kg.ha<sup>-1</sup>) del total de la hojarasca producida. En octubre sólo produjo el 0,3% de hojarasca (25,6 kg.ha<sup>-1</sup>),

**Tabla 10.** Aporte mensual de hojarasca (kg·ha<sup>-1</sup>) de cuatro especies de sombrío del café y durante los años 2004 a 2006.

Mes	2004				2005				2006			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ene	1.129,1 a	191,3 c	223,5 c	385,5 b	1.098,6 a	83,2 b	154,5 b	284,1 b	1.327,2 a	139,5 c	116,9 c	462,0 b
Feb	425,2 a	52,0 b	9,2 b	61,5 b	1.226,6 a	265,1 c	314,0 c	552,5 b	1.024,6 a	0,0 c	253,0 b	383,2 b
Mar	690,0 a	11,0 c	47,0 c	217,0 b	985,4 a	114,2 c	251,6 bc	356,4 b	1.248,6 a	512,4 b	583,9 b	844,4 b
Abr	461,6 a	21,8 c	96,3 bc	187,0 b	1.213,0 a	298,3 c	393,4 c	679,6 b	1.036,6 a	0,0 c	98,8 c	787,7 b
May	482,3 a	0,0 c	48,8 c	338,3 b	798,0 a	169,5 b	285,5 b	614,0 a	1.053,1 a	611,6 bc	711,1 b	374,7 c
Jun	482,3 a	0,0 c	48,8 c	338,3 b	974,0 a	184,1 c	404,3 c	668,6 b	758,8 a	540,0 a	532,6 a	132,9 b
Jul	557,4 a	252,2 b	316,5 b	236,9 b	737,2 a	469,0 a	712,3 a	681,7 a	702,8 ab	649,2 ab	809,9 a	498,2 b
Ago	908,4 a	524,1 b	539,3 b	399,3 b	517,3 bc	351,1 c	711,3 b	1082,1 a	538,2 c	1125,5 b	1.905,3 a	613,5 c
Sep	763,8 a	205,9 b	262,7 b	248,6 b	574,4 b	715,1 b	1272,0 a	816,8 b	875,0 a	725,5 a	958,3 a	858,5 a
Oct	0,0 b	26,5 ab	147,4 a	62,7 ab	340,5 b	344,7 b	241,6 b	853,6 a	25,6 c	294,8 b	224,5 bc	568,1 a
Nov	859,3 a	258,8 c	317,0 bc	475,9 b	613,0 a	140,3 b	411,0 ab	730,8 a	212,9 ab	119,9 ab	91,4 b	304,9 a
Dic	1.158,4 a	30,2 c	42,6 c	291,6 b	823,0 a	434,9 b	69,8 c	613,9 ab	593,6 a	87,4 b	217,8 b	570,5 a

1. *E. grandis* 2. *P. chiapensis* 3. *P. tecunumanii* 4. *I. densiflora*

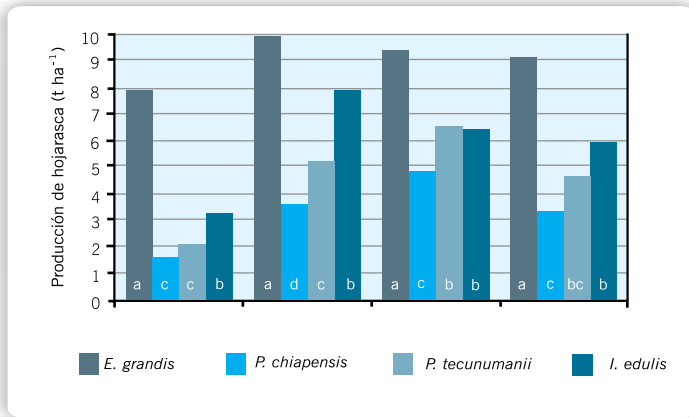
situación coincidente con la deficiencia hídrica registrada en el mes de agosto (Figura 9); este comportamiento de *E. grandis* también se presentó en el año 2004. *P. chiapensis* tuvo su mayor producción de biomasa seca entre agosto y septiembre, lapso en el cual aportó el 38,5% (1.851,0 kg.ha<sup>-1</sup>) de la biomasa seca total producida, con deficiencias hídricas en el mes de agosto; en los meses de febrero y abril este pino empleado como sombrío del café, no produjo hojarasca, sin embargo esta respuesta no tuvo relación con alguna deficiencia hídrica (Figura 9).

*P. tecunumanii* produjo su mayor cantidad de biomasa seca (3.673,5 kg.ha<sup>-1</sup>) equivalente al 56,5% del total, entre los meses de julio a septiembre, el déficit hídrico se registró en agosto; se presentó una producción muy baja de hojarasca en el mes de octubre (3,5%) y entre los meses de enero, abril y noviembre (4,7%). *I. densiflora* aportó su mayor cantidad de hojarasca en los meses de marzo y septiembre, esta producción fue del 26,6% (1.702,9 kg.ha<sup>-1</sup>) de la biomasa seca total producida, mientras que la producción más baja de hojarasca fue de 132,9 kg.mes<sup>-1</sup> y se registró en el mes de junio. Schaffers (58) encontró que el contenido de agua del suelo es el factor que más incide en la cantidad y calidad de la biomasa seca aportada por los árboles en comunidades de plantas.

Las mayores producciones de biomasa seca durante las tres evaluaciones las registró *E. grandis*, éstas fueron de 7.918; 9.901 y 9.397 kg.ha<sup>-1</sup> en los años 2004, 2005 y 2006, respectivamente; el promedio de la producción de hojarasca fue de 9.072 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Las producciones de hojarasca más bajas se registraron en *P. Chiapensis* y fueron de 1.574; 3.569 y 4.806 kg.ha<sup>-1</sup> en los años 2004, 2005 y 2006, respectivamente, con un promedio de la producción de hojarasca de 3.316 kg.ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. *P. tecunumanii* e *I. densiflora* produjeron en promedio 5.512 y 4.954 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de hojarasca, respectivamente.

*Eucalyptus salubris* puede producir cerca de 1.169 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de materia seca, Herwitz y Gutterman (28) y Maggs (41) indican que el promedio de la producción anual de biomasa seca producida por *Pinus elliotii* puede ser de 6.5 t.ha<sup>-1</sup>. En plantaciones de coníferas compuestas por *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Abies borisii*, Kavvadias *et al.* (31) obtuvieron producciones de biomasa de 4.000 kg.ha<sup>-1</sup>; Dames *et al.* (12) reportan producciones de biomasa seca entre 3,64 y 5,89 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en *Pinus patula*. Estudios realizados por Urrego y Farfán (70), muestran que el aporte de materia seca media al año en nogal, pino y eucalipto fue de 3,5; 6,7 y 6,4 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Segura *et al.* (60), estimaron que la biomasa de los árboles *Cordia alliodora*, *Juglans olanchana*, *Inga tonduzzi* e *I. punctata* empleados como sombrío del café, oscila entre 3,5 y 886 kg por árbol.

Nolte *et al.* (47) en *Calliandra calothyrsus* (3.947 plantas/ha), registraron producciones entre 18,9 y 25,0 Mg.ha<sup>-1</sup> de materia seca durante dos años, y en *Acacia senegal*, Deans *et al.* (14), reportan producciones de biomasa seca de 1.770 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> plantados a 6,0 x 6,0 m. En estudios sobre balances de la materia orgánica en sistemas agroforestales, Fassbender *et al.* (18), reportan producciones de biomasa seca de 1.10,6 t.ha<sup>-1</sup> en *Cordia alliodora* y de 13,6 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en *Erythrina poeppigiana*.



**Figura 9.** Promedios de las producciones anuales y promedios generales de hojarasca en *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*, plantadas a 6,0 x 6,0 m, en la finca La Suecia (El Tambo, Cauca).

**Concentración de nutrientes.** Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y materia orgánica en la hojarasca de las cuatro especies arbóreas, se presentan en la Tabla 11.

La concentración media de N de la hojarasca producida por *E. grandis* fue de 0,79%, en *P. chiapensis* de 0,79%, en *P. tecunumanii* de 0,55% y en *I. densiflora* del 1,9%. Los promedios de las concentraciones de P en la hojarasca producida por estas especies fueron de 0,037%, 0,032%, 0,023% y 0,057%, respectivamente.

Los promedios de las concentraciones de K en la hojarasca producida por *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora* fueron de 0,37%, 0,17%, 0,16% y 0,41%, respectivamente. Y los promedios de las concentraciones de Ca fueron de 1,15%, 1,30%, 0,62% y 0,10%, para las mismas especies arbóreas.

El promedio de la concentración de Mg de la hojarasca producida por *E. grandis* fue de 0,15%, en *P. chiapensis* de 0,16%, en *P. tecunumanii* de 0,11% y en *I. densiflora* del 0,15%. Los promedios de las concentraciones de Materia Orgánica en la hojarasca producida por estas especies fueron de 95,9%, 94,9%, 94,7% y 92,3%, respectivamente.

El promedio del contenido de N en la biomasa seca producida por *I. densiflora* fue de 92,7 kg.ha<sup>-1</sup>, el cual fue significativamente mayor al contenido de N en la hojarasca producida por *E. grandis* (71,0 kg.ha<sup>-1</sup>) y al promedio del contenido en la materia seca producida por las dos especies de pino, 26,1 y 28,4 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente. Los valores de los contenidos de N en las dos especies de pino no fueron estadísticamente diferentes (Figura 10 a). Molinero y Pozo (43) obtuvieron contenidos anuales de N en la hojarasca de *Eucalyptus globulus* de 40 kg.ha<sup>-1</sup>. *Calliandra calothyrsus* establecida a 3.947 plantas/ha, produce cerca de 225 kg.ha<sup>-1</sup> de N (47). En *Acacia senegal* plantado a 6,0 x 6,0 m, Deans *et al.* (14) afirman que éstos acumulan cerca de 945 g/árbol de N, y Slodicak *et al.* (23), indican que el N acumulado en la materia seca producida por *Picea abies* fluctúa entre 720 y 950 kg.ha<sup>-1</sup>.

**Contenido de nutrientes.** Los contenidos de nutrientes en la biomasa seca producida por las cuatro especies arbóreas empleadas como sombrío del café se presentan en la Figura 10.

El promedio del contenido de P en la hojarasca producida por *E. grandis* e *I. densiflora* fueron estadísticamente iguales, con valores de 3,2 kg.ha<sup>-1</sup> en el eucalipto y 2,8 kg.ha<sup>-1</sup> en el guamo. Los contenidos de P en estas dos especies fueron superiores a los contenidos de las dos especies de pino, que presentaron valores de 1,0 y 1,1 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente (Figura 10 b). *Calliandra calothyrsus*, establecida a 3.947 plantas/ha, produce cerca de 19 kg.ha<sup>-1</sup> de P (47); y en *Acacia senegal* plantados a 6,0 x 6,0 m, Deans *et al.* (14) indican que éstos acumulan cerca de 38 g/árbol de P.

Los mayores contenidos de K se registraron en la hojarasca producida por *E. grandis* (33,6 kg.ha<sup>-1</sup>), los cuales fueron diferentes estadísticamente a los producidos por *I. densiflora* (9,6 kg.ha<sup>-1</sup>). Las dos especies de pino presentaron los más bajos contenidos de K en la hojarasca, con valores de 6,2 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y 9,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. tecunumanii* (Figura 10 c). En *Acacia senegal* plantados a 6,0 x 6,0 m, Deans *et al.* (14) indican que éstos acumulan cerca de 420 g/árbol de K.

**Tabla 11.** Concentraciones (%) de nutrientes de la hojarasca de cuatro especies de sombra del café.

Especies	Nitrógeno (%)				Fósforo (%)			
	2004	2005	2006	Media	2004	2005	2006	Media
<i>E. grandis</i>	0,81	0,79	0,78	0,79	0,041	0,036	0,034	0,037
<i>P. chiapensis</i>	0,76	0,82	0,78	0,79	0,036	0,031	0,028	0,032
<i>P. tecunumanii</i>	0,64	0,51	0,51	0,55	0,026	0,022	0,021	0,023
<i>I. densiflora</i>	1,90	1,95	1,85	1,90	0,055	0,054	0,061	0,057

Especies	Potasio (%)				Calcio (%)			
	2004	2005	2006	Media	2004	2005	2006	Media
<i>E. grandis</i>	0,37	0,37	0,36	0,37	1,18	1,17	1,09	1,15
<i>P. chiapensis</i>	0,16	0,18	0,16	0,17	1,15	1,35	1,39	1,30
<i>P. tecunumanii</i>	0,16	0,16	0,17	0,16	0,65	0,62	0,58	0,62
<i>I. densiflora</i>	0,36	0,46	0,42	0,41	0,12	0,09	0,08	0,10

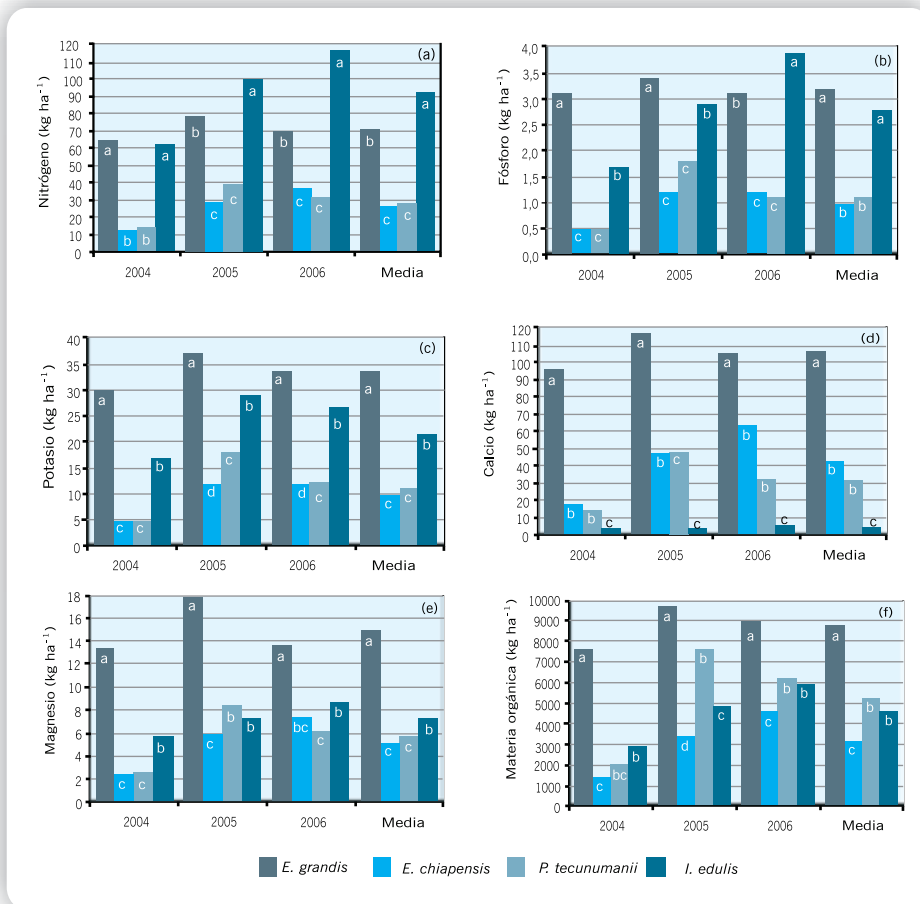
  

Especies	Magnesio (%)				Materia orgánica (%)			
	2004	2005	2006	Media	2004	2005	2006	Media
<i>E. grandis</i>	0,15	0,17	0,13	0,15	95,8	95,9	96,0	95,9
<i>P. chiapensis</i>	0,15	0,17	0,16	0,16	94,8	94,6	95,2	94,9
<i>P. tecunumanii</i>	0,13	0,11	0,10	0,11	93,9	94,9	95,2	94,7
<i>I. densiflora</i>	0,17	0,15	0,13	0,15	91,7	92,6	92,7	92,3



El promedio del contenido de Ca en la biomasa seca producida por *E. grandis* fue de 106,1 kg.ha<sup>-1</sup>, el cual fue significativamente mayor al contenido de Ca en la hojarasca producida por *I. densiflora* (4,5 kg.ha<sup>-1</sup>) y al promedio del contenido en la materia seca producida por las dos especies de pino, que presentaron valores de 43,0 y 31,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente; cabe anotar que el contenido de Ca en las dos especies de pino no fue estadísticamente diferente (Figura 10 d). *I. densiflora* en asociaciones con café como sombrío y establecido a 12,0 x 12,0 m, puede aportar cerca de 11,0 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de materia seca, 199,0 kg de N, 7,7 kg de P, 48,9 kg de K, 158 kg de Ca y 27,3 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de Mg (8).

Los mayores contenidos de Mg los presentó la hojarasca producida por *E. grandis* (14,9 kg.ha<sup>-1</sup>), los cuales fueron diferentes estadísticamente a los producidos por *I. densiflora*



**Figura 10.** Contenido de (a) Nitrógeno, (b) Fósforo, (c) Potasio, (d) Calcio, (e) Magnesio y (f) Materia Orgánica, en la hojarasca producida por *E. grandis*, *P. chiapensis*, *P. tecunumanii* e *I. densiflora*.

(7,2 kg.ha<sup>-1</sup>); las dos especies de pino presentaron los más bajos contenidos de Mg en la hojarasca, 5,2 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y 5,7 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. tecunumanii* (Figura 10 e).

Leclau *et al.* (35) encontraron que la biomasa producida por *Eucalyptus* sp., hasta de siete años de edad contenía 100 kg de N, 30 kg de P, 39 kg de K, 33 kg de Ca y 19 kg de Mg por hectárea, y Maggs (41) obtuvo que la biomasa seca producida por *Pinus elliotii* puede contener cerca de 22,8 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 1,5 kg.ha<sup>-1</sup> de P, 4,5 kg.ha<sup>-1</sup> de K, 33,9 kg.ha<sup>-1</sup> de Ca y 9,3 kg.ha<sup>-1</sup> de Mg. En plantaciones de coníferas compuestas por *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, y *Abies borisii*, Kavvadias *et al.* (31) obtuvieron que los contenidos de nutrientes en la biomasa seca fluctuaban entre 235,4 y 913,9 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 15,4 y 55,8 kg.ha<sup>-1</sup> de P; 40,4 y 113,1 kg.ha<sup>-1</sup> de K; 99,3 y 506,9 kg.ha<sup>-1</sup> de Ca y 39,9 a 285,5 kg.ha<sup>-1</sup> de Mg.

Los promedios de los contenidos de Materia Orgánica en la biomasa seca producida por *E. grandis* fueron de 8.745 kg.ha<sup>-1</sup>, el cual fue significativamente mayor al contenido de materia orgánica en la hojarasca producida por *I. densiflora* (4.580 kg.ha<sup>-1</sup>) y al promedio del contenido en la materia seca producida por las dos especies de pino, con valores de 3.136 y 5.256 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente; el contenido de materia orgánica en las dos especies de pino fue estadísticamente diferente (Figura 10 f).

De este estudio se estableció que:

- El promedio de la producción de hojarasca de *E. grandis*, en los tres períodos de evaluación, fue de 9.072 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, en *P. chiapensis* fue de 3.316 kg.ha<sup>-1</sup>, y para las especies *P. tecunumanii* e *I. densiflora* los promedios fueron de 5.512 y 4.954 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>.
- El promedio del contenido de N en la biomasa seca producida por *I. densiflora* fue de 92,7 kg.ha<sup>-1</sup>. *E. grandis* tuvo 71,0 kg de N ha<sup>-1</sup> y en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii* los contenidos fueron de 26,1 y 28,4 kg.ha<sup>-1</sup>.
- Los promedios del contenido de P en la hojarasca producida por *E. grandis* e *I. densiflora* fueron de 3,2 y 2,8 kg.ha<sup>-1</sup>, y en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii* los valores fueron de 1,0 y 1,1 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.
- Los contenidos de K en *E. grandis* fueron de 33,6 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 9,6 kg.ha<sup>-1</sup>, en *P. chiapensis* de 6,2 kg.ha<sup>-1</sup> y de 9,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. tecunumanii*.
- El promedio del contenido de Ca en la biomasa seca producida por *E. grandis* fue de 106,1 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 4,5 kg.ha<sup>-1</sup>, y de 43,0 y 31,6 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*, respectivamente.
- Los promedios de los contenidos de Materia Orgánica en la biomasa seca producida por *E. grandis* fueron de 8.745 kg.ha<sup>-1</sup>, en *I. densiflora* de 4.580 kg.ha<sup>-1</sup> y de 3.136 y 5.256 kg.ha<sup>-1</sup> en *P. chiapensis* y *P. tecunumanii*.

## LITERATURA CITADA

1. ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) No. 311:1-8. 2003.*
2. ARGÜELLO A., H. Cambios en la composición bioquímica y su aplicabilidad en el uso de follajes verdes como fuente de materia orgánica y nutrimentos en sistemas agroforestales. *Agronomía Colombiana (Colombia) 12(2):169-181. 1995.*
3. AUSTIN A.T.; VITOUSEK P.M. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawaii. *Journal of Ecology, 88(1):129-138. 2000.*
4. BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management, 133(2000):13-22. 2000.*
5. BUNVONG, T.; O, GRANGER. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. *Agri-silvicultura en América Latina - FAO. Unasyuva, 31(126):45-56. 1979.*
6. CALLAHAM, M. A.; ANDERSON, P., H.; WALDROP, T., A.; LIONE, D., J.; SHELBURNE, V., B. Litter decomposition and soil respiration responses to fuel-reduction treatments in Piedmont loblolly pine forests. In: K. Connor, ed., *Proceedings, 12th Biennial Southern Silvicultural Research Conference, Biloxi, MS. Gen. Tech. Rep. SRS-71. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 2004. p. 25-29.*
7. CAMIRÉ C.; TROFYMOW J. A.; DUSCHENE L.; MOORE T.R.; KOZAK L.; TITUS B.; KRANABETTER M.; PRESCOTT C.; VISSER S.; MORRISON I.; SILTANEN M.; SMITH S.; FYLES J.; WEIN R. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: Influence of litter quality and climate. *Canadian Journal of Forest Research. 32(5):789-804. 2002.*
8. CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN K., S. Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrero de guamo. *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) No. 334:1-8. 2005.*
9. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ; *Disciplina de Agroclimatología. Archivos de información climática hasta 1998. Chinchiná (Colombia).*
10. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - Cenicafé. *CHINCHINÁ. COLOMBIA. Anuario Meteorológico Cafetero 2004. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 2005. p. 474.*
11. CORBEELS M. *Plant Litter and Decomposition: General Concepts and Model Approaches. CSIRO Forestry and Forest Products. Newwork shop proceedings, 18-20:124-129. 2001.*
12. DAMES, J. F.; SCHOLES, M. C.; STRAKER, C. J. Litter production and accumulation in *Pinus patula* plantations of the Mpumalanga Province, South Africa. *Plant and Soil, 203:183-190. 1998.*
13. DE LAS SALAS., G. *Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América tropical. San José (Costa Rica), IICA, 1987. 450 p.*
14. DEANS J. D.; DIAGNE O.; LINDLEY D. K.; DIONE M.; PARKINSON J. A. Nutrient and organic-matter accumulation in *Acacia senegal* fallows over 18 years. *Forest Ecology and Management, 124(2-3):153-167. 1999.*

15. DORA, M.; VILLELA, D. M.; PROCTOR, J. Leaf Litter Decomposition and Monodominance in the *Peltogyne* Forest of Maracá Island, Brazil. *Biotropica*, 34(3): 334-347. 2002.
16. FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Colección Libros y Materiales Educativos IICA, N° 81. 1987. 420 p.
17. FASSBENDER, H.W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2a. Ed. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ, Turrialba. 1987. 491 p.
18. FASSBENDER, H. W.; BEER, J.; HEUVELDOP, J.; IMBACH, A.; ENRIQUEZ, G.; BONNEMANN, A. Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 45(1-4):173-183. 1991.
19. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. BOGOTÁ. COLOMBIA. Caracterización edáfica del Ecotopo 211A. Santa Fé de Bogotá (Colombia), FEDERACAFÉ, 1998.
20. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS - FNC.; MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE – MINAMBIENTE. BOGOTÁ. COLOMBIA. Estudio descriptivo de suelos, Lote Suecia, Finca La Suecia, Municipio El Tambo, Departamento del Cauca. Bogotá (Colombia), FNC, 2001. 58 p.
21. FLORENCE R.G. Ecology and silviculture of eucalypt forests. CSIRO Publishing, Australia, 1996. 414 p.
22. GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; SANTOS, M. Decomposição e liberação de nutrientes do folheto de espécies florestais nativas em plantios puros e mistos no sudeste da bahia. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 27(6):1021-1031. 2003.
23. GANJEGUNTE G. K.; CONDRON L. M.; CLINTON P. W.; DAVIS M. R.; MAHIEU N. Decomposition and nutrient release from radiata pine (*Pinus radiata*) coarse woody debris. *Forest Ecology and Management*, 187(2):197-211. 2004.
24. GÓMEZ G., L.; JARAMILLO R., A. El clima de la zona cafetera colombiana y su relación con el cultivo del café. In: 50 Años de Cenicafé 1938-1988. Conferencias Conmemorativas. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 1990. p. 23-32.
25. GUO L.B.; SIMS R.E.H. Effects of light, temperature, water and meatworks effluent irrigation on eucalypt leaf litter decomposition under controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology*, 17(3):229-237. 2001.
26. HARTEMINK, A. E.; O'SULLIVAN, J. N. Leaf litter decomposition of *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* and *Imperata cylindrica* in the humid lowlands of Papua New Guinea. *Plant and Soil*, 230:115-124, 2001.
27. HENIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Annual. Agronomy*, 15(1):161-172. 1945.
28. HERWITZ, S. R.; GUTTERMAN, Y. Biomass production and transpiration efficiencies of eucalyptus in the Negev Desert. *Forest Ecology and Management*, 31(1-2):81-90. 1990.

29. HEUVELDOP, J.; ALPIZAR O., L. A.; FASSBENDER, H.W.; ENRIQUEZ C., G.A.; FOLSTER, H. Modeling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. II. Cacao and wood production, litter production and decomposition. *Agroforestry Systems*, 6:37-48. 1989.
30. JARAMILLO R., A. Climatología de región andina de Colombia; microclima y fenología del cultivo del café. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 2000. 172 p.
31. KAWVADIAS, V. A.; ALIFRAGIS, D.; TSIONTSIS, A.; BROFAS, G.; STAMATELOS, G. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management*, 144(1-3):113-127. 2001.
32. KOCHY, M.; SCOTT D. W. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology*, 78(3):732-739. 1997.
33. KWABIAH A. B.; VORONEY R. P.; PALM C.A.; N.C. STOSKOPF. Inorganic fertilizer enrichment of soil: effect on decomposition of plant litter under subhumid tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 30(3):224-231. 1999.
34. LABRADOR M., J. *Materia orgánica en los agrosistemas*. Madrid. Ministerio de agricultura, Pesca y Alimentación: Mundi-Prensa, D.L. 1996. 174 p.
35. LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management*, 128(3):181-196. 2000.
36. LISKI J.; NISSINEN A.; ERHARD M.; TASKINEN O. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology*, 9(4):575-584. 2003.
37. LÓPEZ, A. M. *Sistemas agroforestales tipo multiestratos*. Asociación Latinoamericana de Integración (ALADI), Departamento de Promoción Económica Montevideo, Publicación No. 11/01 abril de 2001. 50 p
38. LUGO, A. E.; WANG, D.; BORMANN, F. H. A comparative analysis of biomass production in five tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 31(3):153-166. 1990.
39. LUPWAYI N. Z.; HAQUE I. Leucaena hedgerow intercropping and cattle manure application in the Ethiopian highlands. I. Decomposition and nutrient release. *Biology and Fertility of Soils*, 28(2):182-195. 1998.
40. LUSK C. H.; DONOSO C.; JIMÉNEZ M.; MOYA C.; OYARCE G.; REINOSO R.; SALDAÑA A.; VILLEGAS P.; MATUS F. Decomposition of leaf litter of *Pinus radiata* and three native tree species. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74:705-710, 2001.
41. MAGGS, J. Litter fall and retranslocation of nutrients in a refertilized and prescribed burned *Pinus elliotii* plantation. *Forest Ecology and Management*, 12(3-4):253-268. 1985.
42. MCTIERNAN K.B.; COUTEAUX M.-M.; BERG B.; BERG M.P.; CALVO DE ANTA R.; GALLARDO A.; KRATZ W.; PIUSSI P.; REMACLE J.; VIRZO DE SANTO A. Changes in chemical composition of *Pinus sylvestris* needle litter during decomposition along a European coniferous forest climatic transect Soil. *Biology and Biochemistry*, 35(6):801-812. 2003.

43. MOLINERO., J.; POZO., J. Impact of a eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill.) plantation on the nutrient content and dynamics of coarse particulate organic matter (CPOM) in a small stream *Hydrobiologia*, 528:143-165. 2004.
44. MONTAGNINI, F. RAMSTAD, K. SANCHO, M. F. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 23(1):39-61. 1993.
45. MORO M., A. J.; DOMINGO F. Litter Decomposition in Four Woody Species in a Mediterranean Climate: Weight Loss, N and P Dynamics. *Annals of Botany*, 86:1065-1071, 2000.
46. MUNGUÍA., R.; BEER., J.; HARMAND., J-M.; HAGGAR., J. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas. *Agroforestería en las Américas*, N° 41- 42. 2004.
47. NOLTE., C.; TIKI-MANGA., T.; BADJEL-BADJEL. S.; GOCKOWSKI., J.; HAUSER., S.; WEISE S. F. Effects of calliandra planting pattern on biomass production and nutrient accumulation in planted fallows of southern Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 179(1-3):535-545. 2003.
48. OLIVER L.; PÉREZ C., M. E.; BERMÚDEZ DE C., F. Degradación de la hojarasca de un pastizal oligotrófico mediterráneo del centro de la Península Ibérica. *Anales de Biología*, 24:21-32. 2002.
49. OELBERMANN M.; VORONEY R. P.; SCHLÖNVOIGT A. M.; KASS D. C. L. Decomposition of *Erythrina poeppigiana* leaves in 3, 9, and 18 year-old alleycropping systems in Costa Rica. *Agroforestry Systems (Holanda)*, 63:27-32. 2004.
50. OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44:322-331. 1963.
51. PARKASH T., O.; KUMAR., P.; KHOSLA P., K. Structure and function of traditional agroforestry systems in the western Himalaya. I. Biomass and productivity. *Agroforestry Systems*, 9:47-70. 1989.
52. PRAUSE, J; LIFSCHITZ, A. P. Constantes de descomposición de hojas y la relación lignina/celulosa en cuatro especies forestales de la Reserva Estricta de Colonia Benítez – Chaco. *Comunicaciones científicas y tecnológicas* 2001. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. On-line Internet: [www.unne.edu.ar/cyt/2001/cyt.htm](http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/cyt.htm) (consultado enero de 2007).
53. PURI, S.; SINGH, V.; BHUSHAN, B.; SINGH, S. Biomass production and distribution of roots in three stands of *Populus deltoides*. *Forest Ecology and Management*, 65(2-3):135-147. 1994.
54. RIBEIRO C.; MADEIRA M.; ARAUJO M.C. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management*, 171(1):31-41. 2002.
55. SANTA, R. I. Litter fall, decomposition and nutrient release in three semi-arid forests of the Duero basin, Spain. *Forestry*, 74(4):347-358. 2001.
56. SAÑA J. Mineralització de la Fracció Organiconitrogenada dels Adobs Orgànics: Possibles Vies Per A La Seva. Estimació Dossiers Agraris, Problemes moderns en l'ús dels sòls: nitrats. Institució Catalana D'estudis Agraris – ICEA, 1999. p 29-40

57. SARIYILDIZ, T. J. Litter Decomposition of *Picea orientalis*, *Pinus sylvestris* and *Castanea sativa* Trees Grown in Artvin in Relation to Their Initial Litter Quality Variables. Turkish journal of agriculture and forestry, (27):237-243. 2003.
58. SCHAFFERS A., E. P. Soil, biomass, and management of semi-natural vegetation Part I. Interrelationships. Plant Ecology, 158:229-246. 2002.
59. SCHROTH G.; LEHMANN J.; RODRIGUES M. R. L.; BARROS E.; MACÊDO J. L. V. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropicsa. Agroforestry Systems, 53(2):85-102. 2001.
60. SEGURA., M.; KANNINEN., M.; SUÁREZ., D. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. Agroforestry Systems, 68:143-150. 2006.
61. SIMMONS, T. T.; HAWKINS, C.P. Factors influencing lotic leaf litter decomposition rates: results of a large scale study in Western streams, Presented at the NABS Annual meeting, Vancouver, British Columbia, in Organic Matter Processing. North American Benthological Society. 2004. On-line internet: [www.benthos.org/database/allnabstracts.cfm/db/Vancouver2004abstracts/id/201](http://www.benthos.org/database/allnabstracts.cfm/db/Vancouver2004abstracts/id/201) (consultado septiembre de 2005)
62. SINGH K. P.; SINGH P. K.; TRIPATHI S. K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. Biology and Fertility of Soils, 29:371-378. 1999
63. SINHA, M. K.; SINHA, D. P.; SINHA, H. Organic matter transformations in soils (V): kinetics of carbon and nitrogen mineralization in soils amended with diferent organic materials. Plant and Soils, 46:579-590. 1977.
64. SLODICKAK, M.; NOVAK, J.; SKOVGAARD, J. P. Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Forest Ecology and Management, 209(1-2):157-166. 2005.
65. SNOWDON, P.; BENSON, M. L. Effects of combinations of irrigation and fertilization on the growth and above-ground biomass production of *Pinus radiata*. Forest Ecology and Management, 52(1-4):87-116. 1992.
66. STAVER C.; GUHARAY F.; MONTERROSO D.; MUSCHLER R. G. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. Agroforestry Systems, 53(2):151-170. 2001.
67. STIGTER C. J.; MOHAMMED A. E.; NASR AL-AMIN N. K.; ONYEWOTU L. O. Z.; OTENG'I S. B. B.; KAINKWA R. M. R. Agroforestry solutions to some African wind problems. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(10):1101-1114. 2002.
68. THAIUTSA, B.; GRANGER, O. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. Unasylva, 31(126):121-129. 1979
69. TUNDIS V., A. R.; GUERRINI, I., AMARAL.; FRANKEN, W., KARL.; FONSECA. R, C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. Revista Árvore, Viçosa-MG. 28(6):793-800, 2004

70. URREGO, B.; FARFÁN V., F. Aportes de hojarasca en cafetales con sombrío de especies forestales. Cali (Colombia), Smurfit. Cartón de Colombia, 2002. (Informe de Investigación No. 188).
71. WHITE, D. L.; HAINES, B. L.; BORING, L. R. Litter decomposition in southern Appalachian black locust and pine-hardwood stands: litter quality and nitrogen dynamics. *Canadian Journal Forest Research*, 18(1):54-63. 1988
72. WIEDER, R.K.; LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*, 6(36):1636-1642. 1982.
73. XU X.; HIRATA E.; ENOKI T.; TOKASHIKI Y. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. *Vegetatio*, 173(2):161-170. 2004.
74. ZAIA F. C.; GAMA-RODRIGUES A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em Povoamentos de eucalipto na região Norte fluminense. Seção IV – Fertilidade E nutrição do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:843-852. 2004.
75. ZHI-AN LI; SHAO-LIN PENG; DEBBIE J. RAE; GUO-YI ZHOU. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes. *Plant and Soil*, 229(1):105-116. 2001.