

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

**Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete
especies de sombra en un sistema agroforestal con café**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgraduados, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, como requisito parcial para optar el grado de:

Magíster Scientiae

POR

VICTORIA EUGENIA OSORIO MORENO

Turrialba, Costa Rica

2004

Esta tesis ha sido sometida en su presente forma para el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

Tamara Benjamín, Ph.D.

Consejero Principal

Philippe Vaast, Ph. D

Miembro Comité Consejero

Patrice cannavo, Ph. D

Miembro Comité Consejero

Glenn Galloway, Ph. D

**Director Programa de Educación y
Decano de la Escuela de Posgrado**

Victoria Eugenia Osorio Moreno

Candidata

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre, Bernardo Osorio Cardona, quien ha sido la fuente de inspiración más importante especialmente para el logro de mis metas.

A mi madre, Irma Moreno, guía y luz permanente en el camino de mi vida.

A mis hermanas, Liliana, Angela y Diana por su cariño y por demostrarme que a pesar de las dificultades siempre permaneceremos unidas.

A John Jairo, mi esposo, a Natalia y Sebastián mis hijos, por el amor y la paciencia que tuvieron conmigo durante este proceso de aprendizaje.

A la familia Zuluaga Peláez, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible la ejecución de esta tesis.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza **CATIE**, por la oportunidad que me brindaron para adelantar mis estudios de posgrado.

A mi Profesor Consejero Tamara Benjamín, Ph.D, por su constante apoyo y orientación en este trabajo de investigación.

A los miembros del Comité Asesor de tesis: Jean Michel Harmand, Ph.D; Philippe Vaast, Ph.D, Patrice Cannavo, Ph.D, por su acompañamiento técnico y científico en el desarrollo de la tesis.

Al Proyecto Coffee Agroforestry Systems in Central América (CASCA) por su apoyo económico.

Al personal técnico y administrativo de la Escuela de Posgrado de CATIE, por su colaboración y apoyo durante el tiempo de estudio.

Al personal técnico del Laboratorio de Suelos del CATIE, Patricia Leandro, Carlos Martínez y Carlos Fernández.

Al personal técnico del Centro de Investigaciones del Café (**CICAFE**) en Heredia, por permitir desarrollar parte del trabajo de investigación en sus instalaciones, en especial a Luis Dionisio García por su colaboración y sincera amistad.

A todos mis compañeros de la promoción 2003-2004 por su amistad y cariño.

CONTENIDO		Página
I. INTRODUCCIÓN		1
1.1.- OBJETIVOS		2
1.1.1.- Objetivo general		2
1.1.2.- Objetivos específicos		2
1.2.- HIPÓTESIS		2
II.- REVISIÓN DE LITERATURA		3
2.1. Los Sistemas Agroforestales		3
2.1.1. <i>Árboles de sombra en Sistema Agroforestales con café</i>		3
2.1.2. Importancia del nitrógeno		5
2.1.3. La importancia de la materia orgánica		6
2.1.3.1. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo		8
2.1.3.2. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades químicas del suelo		9
2.1.3.3. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades biológicas del suelo		10
2.1.3.4. Comparación entre fertilización nitrogenada y fertilización orgánica		11
2.2. Liberación y mineralización de N a partir de materiales vegetales en descomposición		12
2.2.1. Mineralización e inmovilización del nitrógeno		13
2.2.2. Sincronización entre la oferta y la demanda del N en sistemas agroforestales con		

café	15	
2.2.3. Factores que afectan los procesos de descomposición, liberación y mineralización	16	de N
2.2.4. Índices para predecir patrones de liberación de N	19	
III. MATERIALES Y MÉTODOS	20	
3.1. Liberación del nitrógeno del material foliar y radicular	20	
3.1.1 Descripción del sitio de muestreo	20	
3.1.2 Tratamientos	20	
3.1.3 Muestreo y análisis de datos	21	
3.2 Efectos de la descomposición de material vegetal en el crecimiento inicial plantas de Maíz	24	de
3.2.1 Muestreo y análisis de datos	24	
3.2.2. Análisis estadístico	26	
3.3 Estudio de descomposición de material foliar y radicular de las especies <i>Inga densiflora</i> y <i>Coffea arabica</i>	26	
3.3 1. Descripción del sitio de muestreo	26	
3.3.2. Muestreo y análisis de datos	27	
IV. RESULTADOS	32	
4.1. Liberación del nitrógeno del material foliar y radicular		
4.1.1. Patrones de mineralización de N	32	
4.1.2. Tasas de mineralización semanal en las hojas verdes de especies leguminosas <i>E. poeppigiana</i> e <i>I. edulis</i>	35	
4.1.3. Tasas de mineralización semanal en la hojarasca de las especies leguminosas, maderables y el café	38	
4.1.4. Tasas de mineralización semanal en las raíces de las especies leguminosas maderables y el café	41	
4.2. Efectos de la descomposición de material vegetal en el crecimiento inicial de plantas de maíz	44	
4.3. Descomposición de material foliar y radicular de las especies <i>Inga densiflora</i> y <i>Coffea arabica</i>	48	

4.3.1 Patrones de descomposición de hojarasca y raíces	48
4.3.2 Pérdidas de peso	48
4.3.3 Liberación de N	50
4.3.4 Liberación de C	51
4.3.5 Relación carbono/nitrógeno (C/N)	53
4.4. Sincronización entre la demanda del N por el café y la oferta de los residuos vegetales	53
V. DISCUSION GENERAL	55
VI. CONCLUSIONES	61
VII. RECOMENDACIONES	62
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64
ANEXOS	71

Osorio M, V.E. 2004. Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica. 75p.

Palabras claves: hojas verdes, hojarasca, raíces finas, mineralización de N, maíz, inmovilización, *Coffea*, *Cordia*, *Erythrina*, *Eucalyptus*, *Inga*, *Terminalia*.

RESUMEN

Se realizaron tres ensayos sobre la contribución del material foliar y radicular de siete especies de sombra y el café sobre la disponibilidad y dinámica del N. En el primero, se determinó la mineralización y liberación de N de las hojas verdes de *Erythrina poeppigiana* e *Inga edulis* y la hojarasca y raíces finas de las especies: *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana*, *Eucalyptus deglupta*, *Inga densiflora*, *Inga edulis*, *Terminalia amazonia*, *Terminalia ivorensis* y *Coffea arabica*. Se midieron los contenidos de amonio y nitrato de las hojas verdes, hojarasca y raíces finas mezcladas con el suelo durante una incubación de ocho semanas. Las tasas promedio de mineralización de N por semana fueron significativamente mayores en las hojas verdes de *Erythrina* e *Inga* (21.60 y 19.40 mg N kg⁻¹ de suelo) que el testigo (suelo solo), en la hojarasca fue mayor en las especies de *I. edulis* e *I. densiflora* (6.74 y 3.93 mg N kg⁻¹ de suelo) y menor en las especies maderables y el café. En las raíces finas la tasa de mineralización fue mayor en *C.*

alliodora (14.22 mg N kg⁻¹ de suelo), seguido de *E. poeppigiana* e *I. edulis* (5.61 y 3.79 kg⁻¹ de suelo) en menor grado en el resto de tratamientos. En el segundo ensayo, se determinó el efecto de la descomposición del material foliar y radicular, de las especies anteriores, en el crecimiento inicial de plantas de maíz. La producción de biomasa y la extracción de N por las plantas de maíz fueron mayores en hojas verdes de *E. poeppigiana*. La liberación de N fue mayor en las especies leguminosas que en las maderables. En el tercer ensayo, se evaluaron las tasas de descomposición y liberación de N y C del material foliar y radicular de las especies *I. densiflora* y *C. arabica*. Después de 18 semanas, las pérdidas de peso y N siguieron un patrón exponencial. La descomposición y liberación de N de los materiales evaluados fue mayor en las raíces que en la hojarasca. En conclusión las hojas verdes de especies leguminosas liberaron más N que las especies de sombra por la acción de una rápida descomposición y mineralización, un proceso que favorece una mayor biomasa para las plantas que crecen en asocio con leguminosas, como el café.

Osorio M, V.E. 2004. Decomposition and nitrogen release of foliar, litter and root material from seven shade tree species in coffee agroforestry systems. MSc. Thesis. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 75p.

Key word: foliage, litter fall, fine roots, N mineralization, corn, immobilization, *Coffea*, *Cordia*, *Erythrina*, *Eucalyptus*, *Inga*, *Terminalia*.

ABSTRACT

Leaf and root contributions from seven shade tree species and coffee on N availability and dynamics were studied. Nitrogen mineralization and release from vegetative material of *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana*, *Eucalyptus deglupta*, *Inga densiflora*, *Inga edulis*, *Terminalia amazonia*, *Terminalia ivorensis* and *Coffea arabica* were determined. Ammonium and nitrate contents for green foliage, litter fall and fine roots mixed with soil were measured over eight weeks. The green foliar material from *Erythrina* and *Inga* had the highest N mineralization rates (21.60 y 19.40 mg N kg⁻¹ of soil) when compared to the control (soil). The highest rates for litter fall, were measured for *I. edulis* and *I. densiflora* (6.74 and 3.93 mg N kg⁻¹ of soil). The other shade species and coffee had lower rates. The fine root N mineralization rate was higher in *C. alliodora* (14.22 mg

N kg⁻¹ of soil), followed by *Erythrina* and *I. edulis* (5.61 and 3.79 kg⁻¹ of soil). In a second study, the decomposition of vegetative material (litter and fine roots) of the seven tree shade species was monitored and its effect on the initial growth of corn plants was determined. Biomass production and N extraction by plants were higher from the decomposition of material from *E. poeppigiana*. Nitrogen release under leguminous species was higher than for timber species. In a third study, the decomposition and N release rates were determined for *I. densiflora* and *C. arabica*. Changes biomass as well as nitrogen and carbon contents were evaluated for eighteen weeks. The decomposition and N release of the material evaluated were higher in the roots than for the litter. Leguminous tree species release more N than other shade tree species through higher decomposition and mineralization of green foliar material. This can result in greater biomass and N for plants, such as coffee, growing in association with these species.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mineralización del N en mezcla de suelo con material vegetal de siete especies de sombra, en una incubación de 8 semanas. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2004.	22
Figura 2. Efecto de la mineralización del N en mezcla de suelo con material vegetal de siete especies en el crecimiento inicial del maíz a nivel de invernadero durante 32 días, CATIE. Turrialba, Costa Rica, 2004.	25
Figura 3. Precipitación mensual en la zona de estudio durante el periodo de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.	26
Figura 4. Temperatura mensual registrada durante el periodo de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.	27
Figura 5. Proceso de descomposición de la hojarasca de las especies <i>Inga densiflora</i> y <i>Coffea arabica</i> . CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.	28
Figura 6. Proceso de descomposición de las raíces finas de las especies <i>Inga densiflora</i> y <i>Coffea arabica</i> . CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.	30

- Figura 7. Distribución de bolsas de descomposición en el sistema agroforestal. 31
CICAFE, Heredia, Costa Rica, 2004.
- Figura 8. Patrones de mineralización de N presentada por los tratamientos hojas verde 33
de *Erythrina poeppigiana* e *Inga edulis*, en ocho semanas de evaluación.
CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 9. Patrones de mineralización de N presentada por la hojarasca de las especies y 34
maderables en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa
Rica2004.
- Figura 10. Patrones de mineralización de N presentada por las raíces finas de las 35
especies leguminosas y maderables en ocho semanas de evaluación. CATIE,
Turrialba, Costa Rica, 2004
- Figura 11. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por las 38
especies *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE) y el suelo solo (S).
CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 12. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por la 40
hojarasca de las especies leguminosas *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga
edulis* (IE), *Inga densiflora* (ID) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa
Rica, 2004.
- Figura 13. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por la 41
hojarasca de las especies maderables *Terminalia ivorensis* (TI), *Terminalia
amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucaalyptus deglupta* (ED) y *Coffea
arabica* (C) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 14. Tasas de mineralización por semana de N presentadas por las raíces finas de 43
las especies leguminosas *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE), *Inga
densiflora* (ID) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 15. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por las 44
raíces finas de las especies maderables *Terminalia ivorensis* (TI), *Terminalia
amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucaalyptus deglupta* (ED) y *Coffea
arabica* (C) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 16. Biomasa (materia seca aérea y raíces) de maíz presentada a los 32 días 45
luego de la germinación con suelo mezcla con los tratamientos (HVP: Hojas
verdes de *Erythrina poeppigiana*, HVIE: Hojas verdes de *Inga edulis*, S: Suelo
solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
- Figura 17. Biomasa (materia seca aérea y raíces) de maíz presentada a los 32 días 46
luego de la germinación con suelo mezclado con los tratamientos: HJEP: Hojarasca
de *Erythrina poeppigiana*, HJIE: Hojarasca de *Inga edulis*, HJID: Hojarasca de
Inga densiflora, HJED: Hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, HJCA: Hojarasca de
Cordia alliodora Hojarasca de *Terminalia amazonia*, HJTI: Hojarasca de
Terminalia ivorensis, Hojarasca de *Coffea arabica*, S: Suelo solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Suelo solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

- Figura 18. Biomasa (materia seca aérea y raíces) de maíz presentada a los 32 días luego de la germinación con suelo mezclado con los tratamientos: REP:Raíz de *Erythrina poeppigiana*, RIE: Raíz de *Inga edulis*, RID: Raíz de *Inga densiflora* RED: Raíz de *Eucalyptus deglupta*, RCA: Raíz de *Cordia alliodora*, RTA: Raíz de *Terminalia amazonia*, RTI: Raíz de *Terminalia ivorensis*, Raíz de *Coffea arabica*, S: Suelo solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 46
- Figura 19. Patrones de peso seco remanente presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *Inga densiflora*, HJC: Hojarasca *Coffea arabica*, RID: Raíz *Inga densiflora* y RC: Raíz de *Coffea arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAFAE, Heredia Costa Rica, 2004. 49
- Figura 20. Patrones de pérdida de N presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *Inga densiflora* y HJC: Hojarasca *Coffea arabica*, RID: Raíz *Inga densiflora* RC: Raíz *Coffea arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAFAE, Heredia, Costa Rica. 2004 50
- Figura 21. Patrones de pérdida de C presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *Inga densiflora* y HJC: Hojarasca *Coffea arabica*, RID: Raíz *Inga densiflora* RC: Raíz *Coffea arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAFAE, Heredia, Costa Rica. 2004. 52
- Figura 22. Relación carbono/nitrógeno presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *Inga densiflora* y HJC: Hojarasca *Coffea arabica*, RID: Raíz *Inga densiflora* RC: Raíz *Coffea arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAFAE, Heredia, Costa Rica. 2004. 53
- Figura 23. Cambios fenológicos del café a través de un año en la meseta central de Costa Rica. (Fournier, 1980). 54

LISTA DE TABLAS

Página

- Tabla 1. Tasa promedio de mineralización de N y tasas por semana para cada especie en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 36
- Tabla 2. Concentraciones de N foliar inicial y tasas de mineralización de N por semana de hojas verdes las especies *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 37
- Tabla 3. Concentraciones de N foliar inicial y tasas de mineralización de N por semana de las hojarascas de las especies *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE), *Inga densiflora* (ID) y las especies maderables *Terminalia*. 39

ivorensis (TI), *Terminalia amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucalyptus deglupta* (ED), y *Coffea arabica* (C), CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

- Tabla 4. Concentraciones de N inicial y tasas promedio de mineralización de N por semana de las raíces finas de las especies leguminosas *Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE), *Inga densiflora* (ID) y las especies maderables *Terminalia ivorensis* (TI), *Terminalia amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucalyptus deglupta* (ED) y *Coffea arabica*. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 42
- Tabla 5. Porcentaje de N absorbido y almacenado en el tejido de las plantas de maíz en los tratamientos foliares, después de 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 47
- Tabla 6. Porcentaje de Nitrógeno absorbido y N almacenado en el tejido de las plantas de maíz en los tratamientos radiculares, después de 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. 47
- Tabla 7. Tasas de descomposición ($b^{-\text{día}}$) y estimado del peso remanente o pérdida por descomposición de los cuatro tratamientos evaluados hasta los 126 días. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, 2004. 49
- Tabla 8. Tasas de liberación ($b^{-\text{día}}$) de N de los cuatro tratamientos evaluados hasta los 126 días. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, 2004. 51
- Tabla 9. Tasas de liberación (b) de C de los 4 tratamientos evaluados hasta los 84 días. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, 2004. 52

LISTA DE ANEXOS

- | | Página |
|---|---------------|
| 1. Mineralización acumulada (mg N kg^{-1} de suelo) durante ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. | 72 |
| 2. N mineralizado acumulado de hojas verdes EP e IE (EP: <i>Erythrina poeppigiana</i> , IE: <i>Inga edulis</i>) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004. | 73 |

3. N mineralizado acumulado de hojarasca de las especies leguminosas 73
(*Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE), *Inga densiflora* (ID) y maderables (*Terminalia ivorensis* (TI), *Terminalia amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucalyptus deglupta* (ED) y *Coffea arabica* (C) y el suelo solo (S) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
4. N mineralizado acumulado de las raíces finas de las especies leguminosas 74
(*Erythrina poeppigiana* (EP), *Inga edulis* (IE), *Inga densiflora* (ID) y maderables (*Terminalia ivorensis* (TI), *Terminalia amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *Eucalyptus deglupta* (ED) y *Coffea arabica* (C) y el suelo solo (S) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
5. Determinación de la Materia Seca y el % de N total de las plantas de maíz 75
con la incorporación de material foliar y radicular de los tratamientos en 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.
6. Contenido inicial de C y N y de la relación C/N en hojarasca y raíces en las 75
dos especies evaluadas. CICAFAE, Heredia, Costa Rica, 2004.

I. INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los cultivos económicamente más importantes en Costa Rica. Hasta los años 70s del siglo XX el café se sembró predominantemente en asocio con árboles de sombra, pero con la introducción de variedades de porte bajo no solo permitió una mayor densidad de siembra si no que el uso de sombra fue reducido o eliminado, a la vez que se incrementó la utilización de fertilizantes nitrogenados (Babbar y Zak 1995).

Estos fertilizantes nitrogenados se aplican en grandes cantidades ($100-500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en los agrosistemas de café intensivos (Wrigley, citado por Vasst y Snoeck 1999) para compensar la exportación de la producción (50-70 kg N por tonelada de café oro), la poda, el crecimiento y el mantenimiento de la plantación. Sin embargo, estas prácticas de fertilización no siempre son económicamente viables, además a menudo producen acidificación del suelo y contaminación de las aguas subterráneas en nitratos, como lo muestran Reynold-Vargas *et al.* (1994), en el Valle Central de Costa Rica. Los fertilizantes químicos no son la única y mejor respuesta para mejorar la fertilidad del suelo, hay otros medios como la utilización de técnicas de conservación y un mayor uso de insumos orgánicos para lograr el incremento o mantenimiento del mismo y una productividad sostenible de los cultivos en fincas de pequeños productores (Dofner *et al.* 2000).

Mediante el uso de abonos verdes, grandes cantidades de nutrientes son aportados al suelo, lo cual mejora las características físicas y biológicas (Da Costa 1995). No obstante, es difícil usar estas especies eficientemente dentro de un sistema de producción como abono verde debido a la dificultad de predecir cuanto y cuando la cantidad de nitrógeno aplicado en forma orgánica será liberado en relación con la demanda del cultivo (Vallis y Jones 1973, Swift 1985, Szott y Kass 1993).

Con el presente trabajo, se buscó aportar información sobre la contribución de material foliar y radicular de siete especies usadas como sombra en sistemas agroforestales con café, sobre la disponibilidad del N en el suelo, así como conocer a cerca de los patrones de descomposición, liberación y mineralización de N.

1.1.- OBJETIVOS

1.1.1.- Objetivo General

Comparar la tasa de descomposición y liberación de N de material foliar y radicular de las especies de sombra, *Cordia alliodora* (R.&P.) Oken, *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O. F.Cook, *Eucaliptus deglupta* Blume (Kamerere), *Inga densiflora* Benth, *Inga edulis* Benth, *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel) Exell y *Terminalia ivorensis* A. Chev. (Framiré).

1.1.2.- Objetivos específicos

Comparar el patrón de liberación de N del material foliar (hojarasca y hojas verdes) y raíces finas de *C. alliodora*, *E. poeppigiana*, *E. deglupta*, *I. densiflora*, *I. edulis*, *T. ivorensis*, *T. amazónia*, y *C. arabica* usando una incubación durante 8 semanas.

Medir los efectos de la descomposición del material vegetal *C. alliodora*, *E. poeppigiana*, *E. deglupta*, *I. densiflora*, *I. edulis*, *T. ivorensis*, *T. amazónia*, y *C. arabica* en el crecimiento inicial de plantas de maíz bajo invernadero.

Determinar las tasas de descomposición y liberación de N y C de material foliar y radicular de las especies *I. densiflora* y *C. arabica* en un sistema agroforestal con café.

1.2.- HIPÓTESIS

Existen diferencias entre las especies leguminosas y maderables en el aporte de N a partir de su material foliar y radicular, siendo mayor en las leguminosas.

Existen diferencias, entre los materiales vegetales evaluados, en su efecto sobre el N total disponible en el suelo y su posterior absorción por las plantas de maíz.

Existen diferencias estadísticas significativas entre las tasas de descomposición y liberación de N y C entre el material foliar y radicular de la especie leguminosa de sombra *I. densiflora* y el cultivo asociado, *C. arabica*.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Los Sistemas Agroforestales

Los sistemas agroforestales son sistemas de manejo de los recursos naturales dinámicos, con bases ecológicas, que por medio de la integración de árboles en tierras de finca y tierras abiertas, diversifica y sustenta la producción de productores para un aumento de los beneficios sociales, económicos y ambientales (Leakey 1997).

Fassbender (1993), define los sistemas agroforestales como una serie de sistemas y tecnologías del uso de la tierra en las que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos, en función del tiempo y espacio para incrementar y optimizar la producción en forma sostenida. Por otro lado, Somarriba (1992) lo define como una forma de cultivo múltiple en la que se cumplen tres condiciones fundamentales: 1) existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, 2) al menos uno de los componentes es una leñosa perenne, y 3) al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas (incluyendo pastos).

2.1.1. Árboles de Sombra en Sistemas Agroforestales con Café

La presencia de árboles favorece los sistemas de producción en aspectos tales como el mantenimiento del ciclaje de nutrientes y el aumento en la diversidad de productos. La búsqueda de sostenibilidad ecológica y de conservación de la biodiversidad ambas basadas en perspectivas a largo plazo, hacen que los árboles sean atractivos. La demanda creciente por madera o por árboles vivos por sus funciones ecológicas (fijación de N y C) son elementos que alimentan el interés de plantar más árboles, incluyendo en asociaciones agroforestales (Jiménez *et al.* 2001)

Los efectos benéficos de los árboles sobre la fertilidad de los suelos pueden influir tanto en una mejora en la estructura del suelo como aumentos en la disponibilidad de nutrimentos. Estos efectos de los árboles sobre los suelos son consecuencia de la materia orgánica obtenida por medio de: 1) la hojarasca y las podas, y 2) la descomposición de raíces (Montagnini 1992). Además, las especies arbóreas pueden influir sobre el pH, cationes, materia orgánica, contenido y disponibilidad de nitrógeno y fósforo del suelo. El pH del suelo en una plantación de *Gmelina arborea* sobre ultisoles en Brasil fue de 5.2, mientras que bajo pino el pH fue 3.9, aproximadamente igual que bajo monte nativo (Sánchez *et al.* 1985).

En zonas semiáridas, existe evidencia de la influencia de árboles sobre los suelos en experimentos en los que se compararon muestras de suelo en el trayecto desde el tronco del árbol hasta un área fuera de la influencia de la copa. En especies como *Acacia albida*, *Prosopis juliflora* y *Eucalyptus camandulensis* en el norte de Nigeria, se encontró aumentos en la materia orgánica y nitrógeno en el suelo (Young 1989). El mismo autor encontró, en otros estudios con *Acacia senegal*, *Balanites aegyptica* en el norte de Senegal, los efectos beneficiosos de los árboles con respecto a materia orgánica, retención de agua y disponibilidad de nutrientes.

En América Central, la dominancia de áreas de café bajo sombra versus café a pleno sol puede ilustrar un ejemplo de un sistema agroforestal exitoso que puede ser sostenible a través del tiempo y, a la vez, generar ingresos y trabajo por los productos múltiples como café, madera, frutos y leña.

En Costa Rica, las especies más utilizadas para sombra permanente de café pertenecen a los géneros *Acacia*, *Albizia*, *Erythrina*, *Inga* y *Leucaena*, tratándose de leguminosas que además de la reducción de la intensidad lumínica, fijan nitrógeno en el suelo y aportan cantidades notables de residuos vegetales naturales ó provenientes de podas como material de cobertura (Fassbender 1993). El mismo autor, compara los balances nutricionales de asociaciones de café con árboles de sombra leguminosos y no leguminosos y estimó que árboles de *E. poeppigiana* fijaban 60 kg de N ha⁻¹ año⁻¹.

En los cafetales donde árboles de sombra como *Erythrina* spp. se podan fuertemente o completamente, se pueden formar “islas” de materia orgánica alrededor de los troncos de los árboles (Muschler 1999). Los efectos positivos de los árboles para mantener la fertilidad y estructura del suelo también se notan en una degradación rápida cuando se eliminan los árboles

En un estudio sobre la introducción de árboles maderables en plantaciones de café en Pérez Zeledón, Costa Rica, Tavares *et al.* (1999), halló que las especies maderables más frecuentes encontradas en las fincas cafetaleras eran *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*, establecidas mediante plantaciones y algunas nativas establecidas por regeneración natural, principalmente *Aspidosperma megalocarpon*, *Laforensia puniceifolia* y *Ocotea tonduzii*. Esta preferencia de utilizar especies maderables en esa zona obedeció más a la facilidad de manejo del café, que al valor económico de la madera.

La literatura reporta estudios como los de Fassbender (1993) y Aranguren *et al.* (1982) en sistemas agroforestales donde se han evaluado para el componente arbóreo aspectos relacionados con

producción de biomasa bajo diferentes sistemas de manejo de podas, densidades de plantación y arreglos espaciales, así como también la producción del cultivo asociado. Sin embargo, se sabe muy poco acerca de la tasa de descomposición y liberación de nutrientes, aspectos importantes que permitirían ajustar las podas del componente arbóreo a los ciclos de los cultivos y/o el manejo del cultivo asociado a las curvas de liberación de nutrientes del follaje en descomposición dependiendo del material disponible (Arguello 1988).

En el caso del nitrógeno, además de su contenido total en el suelo es importante conocer las tasas de mineralización, es decir la transformación de nitrógeno orgánico en formas inorgánicas, nitrato y amonio, aprovechables por las plantas (Young 1989, Montagnini 1992).

2.1.2. Importancia del nitrógeno

La importancia del nitrógeno para las plantas se acentúa por el hecho de que sólo carbono, hidrógeno y oxígeno abundan más en ellas. El N es el elemento más importante de los procesos fisiológicos que gobiernan la vida de las plantas; ya que forma parte indispensable de la molécula de clorofila, donde tienen lugar importantes reacciones fotosintéticas (Salisbury y Ross 1994).

El manejo del nitrógeno es uno de los aspectos que hay que tener en cuenta en la producción agrícola ya que las plantas necesitan grandes cantidades de nitrógeno para producir proteínas con toda su potencialidad y transformarlas en granos o forrajes, tanto para consumo humano como animal. Por su parte, el nitrógeno es uno de los elementos más escasos en los suelos agrícolas del mundo. El aire está compuesto mayoritariamente (78%) por nitrógeno, pero las plantas no lo pueden utilizar directamente.

Alexander (1977), comenta que el continuo agotamiento de las fuentes de nitrógeno del suelo y la necesidad de producciones más altas en los cultivos ha dado lugar a un creciente interés por conservar la reserva limitada de este elemento. A causa de que sólo una fracción de la necesidad total de nitrógeno para la agricultura proviene de fertilizantes naturales y sintéticos, la porción faltante debe satisfacer a partir de las reservas del suelo y a través de la fijación biológica del nitrógeno atmosférico.

Del suelo la planta absorbe como elementos mayores, en grandes cantidades el nitrógeno (N) y el potasio (K). El fósforo (P) generalmente se incluye dentro de este grupo porque se aplica en grandes cantidades, no porque sea consumido en gran magnitud por las plantas sino que su uso a partir del

suelo resulta ineficiente. (Bertsch 1995). Elementos medios se consideran el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S), y como elementos esenciales los micronutrientes como el hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl). El nitrógeno, el fósforo y el azufre, son elementos ligados a compuestos orgánicos e inorgánicos en el sistema suelo. Gran cantidad del N en forma gaseosa, es capturado por microorganismos asociados a plantas leguminosas y a plantas no leguminosas.

El aporte de N a partir de minerales primarios es nulo. Su contenido en el suelo depende del reciclaje de la materia orgánica del suelo y de los mecanismos de fijación. La materia orgánica contiene también P y S, que son liberados durante el proceso de humificación, en formas solubles: fosfatos y sulfatos. Los minerales primarios no aportan nitrógeno pero si aportan P y S. A pesar del aporte mencionado, la forma común de hacer accesible estos nutrimentos al suelo, en la exportación agrícola, es aplicando fertilizantes de origen químico que contienen N y P (Kass 1996).

2.1.3. La importancia de la materia orgánica

La materia orgánica del suelo es uno de los materiales más complejos que existe en la naturaleza. Esencialmente todos los residuos de plantas y animales retornan al suelo donde se mineralizan o descomponen por acción de los microorganismos, convirtiéndose en humus, el cual actúa como un depósito que libera gradualmente los elementos N, P, S y micronutrientes esenciales para la nutrición de las plantas y para la población microbiológica del suelo (CENICAFE 1993).

Los suelos tropicales en general contienen niveles mucho más bajos de materia orgánica que los suelos templados, principalmente debido a índices más rápidos de descomposición de la materia orgánica. Sin embargo, en un Andisol en San Pedro de Barva, se encontró que la materia orgánica es alta (entre 8.35% y 4.92%) en los primeros horizontes y sensiblemente baja en los horizontes inferiores (0.73%) (Mata y Ramírez 1999).

Sin embargo los procesos químicos involucrados en el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la química son los mismos independientemente de la latitud; lo que es diferente es su manejo, debido a los diferentes climas, cultivos y condiciones socioeconómicas que prevalecen en los trópicos (Nair 1997).

Vaast y Snoeck (1999), comentan que los agrosistemas tradicionales de café basados en la diversidad vegetal (estratos múltiples compuestos por diferentes árboles maderables, leguminosas

arbóreas y frutales con café en el sotobosque) son menos productivos en términos de café oro, pero más estables y sostenibles que el monocultivo de café sin sombra. Una de las premisas más importantes, es el reconocimiento de que es posible ampliar el potencial biológico, integrándolo a los sistemas productivos, haciendo un uso inteligente de la naturaleza y comprendiendo los límites biológicos y físicos de los sistemas. Esto es debido a los efectos benéficos de los árboles de sombra para conservar la materia orgánica y reciclar nutrientes a través de la hojarasca y forraje del subsuelo, mediante sus profundos sistemas radiculares, así como para limitar el estrés ambiental y los desbalances nutricionales del café y para regular el crecimiento y la productividad del cultivo (Beer *et al.* 1998).

En plantaciones de café y cacao con sombra de árboles, la devolución de hojarasca y podas es de 100-300 kg de N por ha⁻¹ año⁻¹, que es mucho más alto que la cantidad extraída durante la cosecha o derivado de la fijación de nitrógeno (Young 1989). Gupta (1986) midió unos 1800 kg ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca seca de *Eucalyptus sp.*, mucho menos que lo producido por *Tectona grandis* (4600 kg ha⁻¹ año⁻¹) en plantaciones de Dehra Dun en India. Otros estudios realizados en esta especie indican que existe una variabilidad en la producción de hojarasca, las que están en función de la especie, densidad de plantas por unidad de área, condiciones de clima (precipitación, altitud), calidad de los suelos y la edad de los árboles.

Los aportes de material orgánico al suelo debido a las podas, es importante para el proceso del ciclaje de nutrientes dentro de los sistemas de café- *Erythrina* (poró). Russo y Budowski (1986), reportaron una producción de 11800 kg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca a través de dos podas realizadas como parte del manejo dado. Glover y Beer (1983), en parcelas de café con sombra de *Erythrina* (poró) y café con poró y *Cordia alliodora*, mostraron que la cantidad de nutrientes reciclados por la hojarasca de los árboles asociados, alcanzaba los niveles de fertilizaciones recomendados para la producción del café en ambos casos. Los mismos autores, reportan una producción de 17800 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N de materia seca, bajo manejo de tres podas. Esto demuestra que los árboles de *Erythrina* aportan cantidades importantes de materia orgánica al suelo, mejorando el ciclaje de nutrientes.

Actualmente, hay un reconocimiento sobre la importancia de los árboles de sombra en cafetales por razones ecológicas y económicas. Durante más de medio siglo, se ha generado un gran debate sobre la necesidad de los árboles de sombra, y en varios países en alguna época se eliminaron los árboles de muchos cafetales. En la mayoría de estos casos, se llegó a la conclusión de que la eliminación de la sombra fue un error, pues aunque los rendimientos del café aumentaron temporalmente, los

cafetos se agotaron, más rápidamente y aumentaron los costos de fertilizantes y otros insumos (Galloway y Beer 1997).

De acuerdo con Beer *et al.* (1998), las consecuencias ambientales negativas y la fragilidad económica del monocultivo intensivo del café, cuando los precios son bajos, han hecho dudar sobre su pertinencia socioeconómica. Estos autores han reenfocado la atención hacia el papel benéfico de los árboles de sombra, y hacia sistemas basados en la asociación permanente de una leguminosa de cobertura fijadora de nitrógeno (N) atmosférico. Sin embargo este planteamiento debería ir sujeto con el desarrollo de estrategias de manejo que estimulen las actividades microbianas y los procesos biológicos del suelo en los agroecosistemas de café para mejorar el ciclaje y la disponibilidad de nutrimentos, reducir su pérdida, disminuir la degradación del medio ambiente e incrementar su rentabilidad para los productores.

2.1.3.1. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo

La materia orgánica desempeña un papel importante en la estructura, aeración y capacidad del suelo para sostener el agua, y ofrece un medio favorable para el crecimiento de raíces y para la captación de nutrimentos. El humus, la fracción más estable de la materia orgánica, forma asociaciones de enlaces con partículas de arcillas, las cuales incrementan la agregación del suelo y la formación de microporos, lo que mejora la estructura del suelo (Vaast y Snoeck 1999).

Los contenidos de materia orgánica y de N en los suelos están determinados, en primer lugar, por el clima y la vegetación y en segundo lugar, por factores locales como el relieve, material parental del suelo, tipo y duración de la explotación de los suelos y por otras características físicas y microbiológicas (Fassbender y Bornemiza 1987).

El contenido porcentual de materia orgánica en la primera capa del suelo es alto con respecto a las capas subsiguientes. Díaz-Romeu (1970) mostró que los valores del contenido de la materia orgánica del horizonte A en suelos tropicales, varían en un promedio del 2% al 5%, siendo los valores máximos del 6% en suelos asociados a cenizas volcánicas. En el horizonte B, salvo excepciones como la de los suelos derivados de cenizas volcánicas, la disminución de la materia orgánica es notoria por la acumulación de restos orgánicos y la actividad de los microorganismos en los primeros decímetros del suelo (Fassbender 1993).

Otra característica importante de la materia orgánica es la presencia de cobertura en el suelo promoviendo la deposición de sedimentos y disminuyendo las pérdidas de suelo por acción del agua de escorrentía y el viento. Se ha calculado que estas pérdidas pueden llegar a ser de 0.5 t ha^{-1} en suelos cubiertos (Noa *et al.* 1987), mientras que en suelos libre de vegetación o limpios se pueden alcanzar valores hasta de 130 t ha^{-1} (CIAT 1998). Además se reduce la evaporación del agua del suelo ya que actúa como un colchón que conserva la humedad (Cubero 1994).

2.1.3.2. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades químicas del suelo

La materia orgánica de los abonos verdes tiene una serie de efectos positivos en el suelo, como hacer que los nutrientes estén más disponibles para los cultivos. Los abonos verdes pueden desempeñar un papel importante en la restauración de los suelos degradados. Su utilización puede resultar en un incremento de la fertilidad del suelo tanto de su conservación sino de la recuperación del mismo.

Los árboles a través de su sistema radicular profundo, pueden absorber nutrientes de zonas más profundas, donde no llega el área radicular de los cultivos. Los nutrientes, almacenados en raíces, troncos, ramas y hojas al descomponerse son liberados al suelo para ser tomados por los cultivos. De esa manera, otros nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio pueden aumentar sus concentraciones en la capa arable del suelo (Alegre y Rao 1996). La utilización de plantas como enmiendas además conlleva a una liberación gradual de nutrientes, especialmente N, P y S y al aumento del carbono en el suelo (Kass 1996).

Con este propósito generalmente son utilizadas especies leguminosas, por su alto contenido de N y por su disponibilidad de absorción por los cultivos (Giller y Wilson 1991). Los abonos verdes de especies leguminosas pueden acumular más de 100 kg ha^{-1} de N en tan solo 50-60 días, siendo aproximadamente el 80% de este elemento, derivado a partir de su fijación de la atmósfera (Yadvinder-Singh *et al.* 1994).

El empleo de material vegetal como abono verde puede adicionalmente ayudar a la disminución de la acidez, debido al aporte de bases del suelo (Young 1989) y/o porque la materia orgánica añadida actuaría como regulador impidiendo cambios bruscos en el pH (Kass 1996). Las adiciones de materia orgánica poseen adicionalmente la capacidad de favorecer la formación de complejos

órgano-minerales en el suelo, principalmente con micronutrientes, lo cual evita su lixiviación (Sánchez 1981).

Por otra parte en la materia orgánica se encuentra la mayor cantidad de N, así como cantidades considerables de fósforo y de micronutrientes (boro, zinc, etc). La mineralización de la MO como residuos de cultivos, hojarasca, “mulch”, residuos de podas de café y de árboles asociados, estiércol y “compost”, puede contribuir en gran parte a la demanda de nutrientes del café (Vaast y Snoeck 1999).

Estudios sobre mineralización y pérdidas de N han permitido mejorar el conocimiento sobre el ciclo y el balance de N en agrosistemas de café en América Central (Babbar y Zak 1995, Reynold-Vargas *et al.* 1994). Estos estudios han demostrado que cada año se mineralizan grandes cantidades de N (100-150 kg N ha⁻¹ año⁻¹) de las cuales una parte importante se pierde por lixiviación (10-50 kg N ha⁻¹ año⁻¹).

2.1.3.3. Efectos de la materia orgánica sobre las propiedades biológicas del suelo

El aporte de materia orgánica supone una adición de alimentos y energía para los microorganismos y demás flora responsable de llevar adelante los ciclos bioquímicos en la naturaleza, bien por la mejora de las condiciones físico-químicas del suelo o bien por el aporte de microorganismos beneficiosos en sí o por activación de los más favorables en detrimento de los patógenos. No obstante con la flora que se adiciona al terreno pueden entrar algunos macro y microorganismos indeseables.

La materia orgánica presenta efectos directos e indirectos sobre la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento vegetal. Para servir como fuente de N, P, y S a través de su mineralización por los microorganismos del suelo, la materia orgánica influye el aporte de nutrientes desde otras fuentes. Por ejemplo la materia orgánica se requiere como fuente de energía para la fijación bacteriana de N, por lo tanto la cantidad de N₂ molecular fijado por los fijadores libres será influenciada por la cantidad de energía disponible en la forma de carbohidratos (Silva *et al.* 1992).

Material vegetal como residuos de cultivos, hojarasca, residuos de podas incorporados al suelo, son determinantes para la actividad de los microorganismos, ya que constituyen una fuente importante de energía para su crecimiento (Da Costa 1995), representando un 1-5% del C y N y hasta 19% del P orgánico (Meléndez 2003). El crecimiento de la biomasa microbiana en los residuos aumenta el

movimiento de la materia orgánica del suelo, a través de reacciones concurrentes de inmovilización, mineralización y estabilización. Estos procesos fundamentales ayudan a mantener el ciclo de nutrición de las plantas y es importante para la conservación de la materia orgánica del suelo a largo plazo, a través de la producción de precursores de sustancias húmicas. La formación de sustancias orgánicas estabilizadoras de la estructura del suelo depende, principalmente, de la incorporación de residuos y de las prácticas de manejo de suelos (Voroney *et al.* 1989).

2.1.3.4. Comparación entre fertilización nitrogenada y fertilización orgánica

Los fertilizantes se definen como un material orgánico e inorgánico que se agrega al suelo para suplir ciertos elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (Soil Science Society of America 1987). Las ventajas de los fertilizantes orgánicos versus los inorgánicos han sido por mucho tiempo debatidas. La predicción de la cantidad y la calendarización de los nutrientes suministrados por fuentes orgánicas son difíciles. Por el contrario, los fertilizantes inorgánicos ofrecen la ventaja significativa de un control seguro de las proporciones, lugares, fuentes y calendarización de las aplicaciones (Szott y Kass 1993).

Fertilización orgánica

Se puede aplicar cantidades considerables de nutrientes en forma orgánica a través de los desechos de hojas y podas en los sistemas agroforestales (Budelman 1989, Hawkins *et al.* 1990, Szott *et al.* 1991). Las cantidades aplicadas pueden variar dependiendo del clima, tipo de suelo, especies de árbol, espacio y técnicas de manejo. El uso eficiente de los fertilizantes orgánicos en la agroforestería requiere de un entendimiento de los controles de la liberación de nutrientes de estas fuentes (Szott y Kass 1993).

Ventajas:

Al incorporar materia orgánica mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Contribuye al aporte de otros nutrientes como los microelementos, y ácidos fúlvicos y húmicos e incrementa la actividad de microorganismos. Además contiene formas más asimilables para las plantas, que se encuentran en constante transformación en el suelo, que van a dar mayor vigor a la planta, reduciendo la susceptibilidad a la incidencia de plagas y enfermedades, lo que constituirá un menor gasto en la compra de plaguicidas, adherentes, microelementos, entre otros (Szott y Kass 1993).

Desventajas:

Presentan una menor disponibilidad de grandes cantidades y diferente composición química.

Fertilización inorgánica

Existen numerosos manejos agronómicos y tecnologías de fertilización inorgánica que permiten aumentar la eficiencia de recuperación de N en los cultivos. El desarrollo de fertilizantes nitrogenados que permitan aumentar la eficiencia de recuperación de N del fertilizante, corresponde a la proporción del N aplicado que es recuperada por el cultivo, descontando el aporte de N que hace el suelo. El tipo de fertilizante, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y la época de aplicación, entre otras variables afectan la eficiencia de uso del nitrógeno (Szott y Kass 1993).

Ventajas:

Disponibilidad para varias hectáreas así como para las plantas, además presentan altas concentración de nutrientes.

Desventajas:

Sólo aportan algunos elementos nutritivos, cuyos residuos químicos de las sales que contienen producen la salinización y compactación del suelo. Se presenta una disminución de la actividad microbiana. También se puede presentar problemas en el drenaje, en la adsorción de nutrientes por la solución suelo y en la absorción equilibrada de nutrientes por las plantas (Szott y Kass 1993). Se ha comprobado que cada año se incrementa la cantidad de fertilizantes a aplicar, debido a la menor eficiencia de adsorción en el suelo y absorción en la planta. Además que al suministrar sólo estos nutrientes a la planta se produce el desbalance interno en el metabolismo de la planta, provocando mayor susceptibilidad a enfermedades y ataque de plagas, por lo tanto mayor incremento en la compra de agroquímicos como plaguicidas, fungicidas, entre otros.

2.2. Liberación y mineralización de N a partir de materiales vegetales en descomposición

La descomposición de materiales vegetales puede definirse como el proceso mediante el cual se degradan sus tejidos hasta los constituyentes elementales de las proteínas, carbohidratos, grasas y otros (Fassbender 1993). La liberación de N es el término usualmente empleado para designar la pérdida de este elemento (en forma orgánica y/o mineral) a partir de materiales en descomposición

(Palm y Sánchez 1990). Mientras que la mineralización de N se refiere estrictamente al proceso de transformación de N orgánico en N mineral, proceso que es importante para el crecimiento de las plantas (Alexander 1977).

La descomposición de los tejidos vegetales y la liberación y mineralización de N frecuentemente muestran una fase inicial rápida, las cuales son degradados por los microorganismos que componen la biomasa del suelo, obteniéndose productos secundarios (constituyentes de la pared celular, como celulosa y hemicelulosa). Esta nueva biomasa y sus productos metabólicos son, a su vez, sustratos para la segunda fase, que es mucho más lenta, regulada principalmente por el contenido de lignina (Anderson e Ingram 1993). La relación C/N y la relación lignina/celulosa de los residuos vegetales tiene mucha influencia en la velocidad de descomposición del material vegetal (Swift *et al.* 1979, Wild 1972). A su vez, el mismo autor, determinó que la etapa rápida de descomposición se cumple dentro de los tres primeros meses y que a partir del segundo trimestre comienza la segunda fase de descomposición que es mucho más lenta. Este efecto puede explicarse por la diferente composición química del material vegetal que tiene mayor influencia que la climatología del sitio, por lo menos, en la descomposición a corto plazo.

En las leguminosas, especialmente *Erythrina* spp, Palm y Sánchez (1990) determinaron que esta especie se descompone y libera nutrientes significativamente más rápido debido a la presencia de bajos contenidos de polifenoles en las hojas al compararse con *Inga edulis* y *Cajanus cajan*.

2.2.1. Mineralización e inmovilización del nitrógeno

El suelo contiene una mayor proporción de N orgánico (no disponible), el cual representa el 98% del total de N en el suelo y una pequeña proporción de N inorgánico (disponible) representando solo del 2 al 3%. Este proceso es denominado mineralización y se presenta a medida que los microorganismos del suelo descomponen la materia orgánica para obtener energía. Los microorganismos usan parte de la energía liberada y parte de los nutrientes esenciales contenidos en la materia orgánica. Cuando los organismos han usado todos los nutrientes que necesitan, el exceso es liberado al suelo en forma inorgánica para ser utilizado por las plantas. Este proceso esencialmente microbiológico esta influenciado por la temperatura, la humedad, el pH, propiedades edáficas como textura, estructura, composición química y mineralógica y manejo del suelo (Myers *et al.* 1994).

El N disponible en el suelo depende en gran medida de la mineralización del N orgánico. Mediante este proceso los componentes orgánicos, ya sea del humus del suelo o de los residuos vegetales y animales recién incorporados al mismo se transforman a formas inorgánicas nitrogenadas tales como el amonio, nitrito y nitrato. Esta mineralización consiste en tres etapas:

- * Aminización, la transformación de proteínas a amina
- * Amonificación, transformación de amina en amonio
- * Nitrificación, transformación de amonio en nitrato con una etapa intermedia corta de formación de nitrito (Sánchez 1981, Bertsch 1995).

El N puede también pasar de una forma inorgánica a una forma orgánica, presentándose el proceso de inmovilización. La inmovilización ocurre cuando se incorporan al suelo residuos de cultivos con contenido alto de C y bajo de N. La mineralización y la inmovilización ocurren simultáneamente en el suelo. El cambio de un suelo a dominancia de formas orgánicas o inorgánicas de N depende principalmente por la relación C/N de la materia orgánica que se está descomponiendo. En forma general, una relación C/N baja tiende a favorecer la mineralización, en tanto que relaciones mayores de 25 conducen a una lenta mineralización o bien a la inmovilización del N (Bertsch 1995).

El N mineralizado, es uno de los parámetros que con más frecuencia se ha empleado para evaluar el N disponible en el suelo. El nitrógeno mineralizado por incubación aeróbica (Bremmer 1965) o incubación anaeróbica (Waring y Bremmer 1964), ha correlacionado muy bien con el rendimiento o el nitrógeno asimilado por las plantas en condiciones de campo (Solórzano 1997).

En tal sentido estudios de Tañer y Cuevas (1998) en bosques naturales de montañas tropicales de varias regiones de mundo sugieren que con creciente altitud el N se torna más limitante para la productividad, debido a la baja tasa de mineralización, mientras a menor latitud P es el principal factor limitante. Existen muchos indicios de que el cambio entre condiciones secas y húmedas es lo que favorece la mineralización. Por otro lado Montagnini *et al.* (1999) reportaron que los nutrientes, productos de la mineralización, pueden llegar a la solución del suelo y ser lixiviados o retornar a las plantas por la vía de absorción de las raíces. Adicionalmente a esto los procesos de transferencia del nitrógeno dentro del agroecosistema se basan en la producción de residuos y su descomposición (fragmentación, mineralización y humificación) y el paso del nitrógeno con el agua a través del mismo (Fassbender 1993).

Estudios de campo más recientes sobre mineralización y pérdidas de N han permitido mejorar substancialmente el conocimiento sobre el ciclo y el balance de N en agroecosistemas de café en Centroamérica (Babbar y Zak 1995, Reynold-Vargas *et al.* 1994). Estos estudios han demostrado que cada año se mineralizan grandes cantidades de N ($100-150 \text{ kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) de las cuales una parte importante se pierde por lixiviación ($10-50 \text{ kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$). Además de lo anterior, estas investigaciones han mostrado el papel importante que juegan los árboles de sombra para incrementar la mineralización de N y reducir la lixiviación del nitrato.

En un estudio sobre la disponibilidad y dinámica de N en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General en Costa Rica, Gutiérrez (2003), determinó que las especies maderables *T. ivorensis*, *E. deglupta*, y *T. amazonia*, y las leguminosas *E. poeppigiana* y de *Inga* sp presentaron mayores tasas de liberación de N por sus residuos (hojas y raíces) e influenciaron positivamente el contenido de nitratos del suelo y el N potencialmente disponible del suelo.

Adicional a esto, Meléndez *et al.* (1995), en un ensayo de mineralización de N de material foliar de especies de *Inga* (18 introducciones), encontró que hubo relativamente pocas diferencias en la cantidad de N mineralizado entre introducciones de la misma especie.

En un estudio de liberación de N en leguminosas tropicales bajo condiciones de incubación, (Palm y Sánchez 1990) encontraron que no todas las hojas de leguminosas se descomponen y mineralizan el N rápidamente, pese a las altas concentraciones de N en las hojas reportaron que la mineralización neta del N ocurre si la concentración de N de las misma era superior a 2% y por el contrario se produce la inmovilización si la concentración es inferior a ésta.

Swift (1985), menciona que la mineralización medida durante una incubación puede ser afectada por las condiciones micro-ambientales del ensayo, la cantidad de N adicionado, y la forma química o calidad del material agregado.

2.2.2. Sincronización entre la oferta y la demanda del N en sistemas agroforestales con café

La calendarización y frecuencia con que los nutrientes están disponibles para las plantas afecta la recuperación de los nutrientes. En muchos sistemas se han hecho intentos para sincronizar la aplicación de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos con la demanda de nutrientes del cultivo (Szott *et al.* 1994). Meléndez (2003), afirma que la sincronía ocurre cuando la liberación del

nutrimento es similar a lo requerido por la planta tanto en espacio como en el tiempo. Se aplica el concepto a los ciclos de N, P y S, donde un manejo adecuado puede aumentar (mineralización) o inhibir (inmovilización) la cantidad de nutrimento disponible a la planta.

La falta de sincronía ocurre cuando un nutrimento está liberado durante periodos de poca demanda por la planta, cuando la tasa de liberación es mayor que la absorción, o cuando la liberación es menor que la demanda. Para reducir la posibilidad de pérdidas, la mineralización debe estar en sincronía con la demanda de la planta. Existe una jerarquía de controles: clima (humedad y temperatura) y suelo (textura, mineralogía, acidez, otros nutrimentos) calidad y cantidad de residuos, organismos; el drenaje y capacidad de retención de agua afecta la mineralogía y textura afectan la absorción de P. La planta de café necesita N durante todo su periodo de desarrollo vegetativo teniendo unos picos máximos de demanda de este elemento en las diferentes fases fenológicas del cultivo cuando esta en floración, fructificación y producción de nuevas hojas. Por tanto, es importante poner a disposición el N durante estas fases de la planta para evitar deficiencias de este elemento en la planta, mediante prácticas adecuadas de manejo realizando fertilizaciones nitrogenadas o aplicando abonos orgánicos como lombricompost, broza de café, gallinaza o residuos vegetales de especies leguminosas y maderables asociadas al cultivo.

2.2.3. Factores que afectan los procesos de descomposición, liberación y mineralización de N

La descomposición de los materiales vegetales y la liberación y mineralización de N son procesos regulados por la descomposición química de los tejidos, las condiciones ambientales, las características edáficas y la fauna y los microorganismos del suelo (Singh y Gupta 1977, Swift *et al.* 1979, Anderson y Swift 1983, Handayanto *et al.* 1995, Mafongoya *et al.* 1997).

?? Organismos descomponedores

La descomposición efectuada por organismos esta caracterizada por una compleja comunidad de biota incluyendo la microflora y la fauna del suelo. Los hongos y las bacterias son fundamentalmente los responsables para que se efectúen los procesos bioquímicos en la descomposición de residuos orgánicos (Tian *et al.* 1997). La fauna del suelo aumenta la biodegradación y humificación de residuos orgánicos usando varios caminos:

1. Pulverizando los residuos orgánicos y aumentando el área superficial para la actividad microbiana.
2. Produciendo enzimas que transforman biomoléculas complejas en compuestos simples y polimericen los compuestos para formar el humus.
3. Mejorando el ambiente para el crecimiento y las interacciones microbianas., por ejemplo, los gusanos aumentan la descomposición de residuos orgánicos y la liberación de alimentos degradando los residuos de la planta.
4. Incorporando la materia orgánica en el suelo (Lavelle 1994, Tian *et al.* 1997).

Un factor que influye en la población microbiana es la humedad, que es importante en el crecimiento de los microorganismos y en la velocidad de la descomposición. Alexander (1977) señala que el nivel óptimo de humedad para los organismos descomponedores que se hallan en el suelo es de 60-70%, sin embargo este nivel puede variar dependiendo de la temperatura.

Tian *et al.* (1997) mencionan, que la diversidad de flora es capaz de liberar amonio de los residuos en descomposición; las bacterias, hongos y actinomicetos pueden atacar este tipo de compuestos con la consecuente mineralización de N, aunque las tasas varían de acuerdo a los grupos involucrados. El amonio (NH_4^+) es oxidado por *Nitrosomonas* a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) por *Nitrobacter*, reacciones que proporcionan a estos organismos energía para su proliferación y sobrevivencia (Salisbury y Ross 1994).

En conjunto con la mineralización del N existe también el fenómeno de la inmovilización el cual lleva a la síntesis de nuevas moléculas orgánicas a partir de formas inorgánicas. Este proceso es también llevado a cabo por los microorganismos del suelo se da en mayor grado cuando los residuos son de baja calidad son adicionados (Heal *et al.* 1997). La mineralización neta de N en el suelo puede ser considerada entonces como un balance entre los procesos de mineralización e inmovilización (Giller y Wilson 1991).

?? **Calidad del material vegetal**

Actualmente, se le esta dando una mayor importancia al estudio del aporte de minerales a través de la descomposición de materia orgánica que ofrecen los árboles de especies leguminosas y no leguminosas en los sistemas agroforestales. Los árboles son capaces de mantener o aumentar la fertilidad de los suelos a través del reciclaje de nutrientes, mantenimiento de la materia orgánica del suelo por medio de la producción y descomposición de hojarasca y de los residuos de podas

(Mafongoya *et al.* 1998, Palm y Sánchez 1990). La descomposición de residuos vegetales sobre la superficie del suelo es de particular importancia para los procesos de transformación de la materia orgánica y las relaciones tróficas del suelo, las que dependen de las condiciones del suelo, pH, humedad y temperatura (Bahuguna *et al.* 1990) y el manejo brindado al suelo. También se mencionan otros factores, como son: la aireación, la acidez y los nutrientes del suelo (De la Salas 1987).

La cantidad de material vegetal, su composición y propiedades son esenciales dado que controlan los procesos de descomposición, mineralización y humificación (Kogel-Knabner 2002) y actúa como la fase de transición entre la biomasa viva y el suelo (Cuenca *et al.* 1983).

Las tasas de descomposición y liberación de nutrientes son determinadas por la calidad de la materia orgánica (Swift *et al.* 1979). La calidad del material vegetal es definida por los constituyentes orgánicos y los contenidos de nutrientes. La calidad del carbono de un material orgánico depende de las proporciones del carbón soluble, celulosa (hemicelulosa) y lignina; la calidad, en este caso se refiere a la energía disponible para los organismos descomponedores:

- ?? El carbón soluble que incluye carbón metabólico y de almacenamiento, es de alta calidad y es principalmente responsable de promover el crecimiento y la actividad microbial (Smith 1994). La cantidad de carbón soluble es también quien determina la mineralización de nutrientes o patrones de inmovilización.
- ?? La celulosa, o estructuras polisacáridas, son de calidad intermedia para la descomposición y son atacados por microbios después que los carbohidratos solubles se han agotado (Swift *et al.* 1979).
- ?? La lignina es considerada como el componente más importante para la determinación de las tasas de descomposición (Meentemeyer 1978).

Condiciones ambientales

El proceso de la mineralización es afectado principalmente por factores tales como: pH, temperatura y la humedad. La temperatura y la precipitación modifican la naturaleza y la rapidez de la descomposición del material vegetal, si se presenta un cambio en la temperatura, este puede alterar la composición de la flora activa y afectar los procesos de descomposición y liberación de nutrientes (Bertsch 1995). Handayanto *et al.* 1995, menciona que las tasas de descomposición y de

liberación de N son más altas bajo condiciones de alta precipitación, muy probablemente debido a la remoción de compuestos solubles de carbono o polifenoles.

El pH del suelo, puede regular las tasas de descomposición debido al efecto indirecto sobre los organismos que en él habitan (Singh y Gupta 1977). Cada ser vivo posee un pH óptimo para su crecimiento y máxima actividad. En pH bajos, los hongos son más preponderantes que en condiciones básicas, siendo las bacterias más activas bajo esta última condición, de tal forma que la descomposición y la mineralización del N resulta más alta en suelos neutros que en suelos ácidos (Alexander 1977).

2.2.4. Índices para predecir patrones de liberación de N

Muchos investigadores han desarrollado predictores o índices de pérdidas y de liberación de N (Palm y Sánchez 1991, Handayanto *et al.* 1995, Lehmann *et al.* 1995, Mafongoya *et al.* 1998). Estos índices incluyen tasas de carbón a nitrógeno (C:N), polifenol a nitrógeno (PP:N), lignina a nitrógeno (L:N), y polifenoles + lignina a nitrógeno (PP+L):N.

Todos estos índices son aparentemente válidos pero dependen del tiempo considerado y del tipo de material. Por ejemplo, el nitrógeno mineralizado en corto tiempo puede ser negativamente correlacionado con PP:N cuando se considera material verde con alto contenido de N y también concentraciones substanciales de polifenoles solubles totales (Palm y Sánchez 1991). Las tasas de (PP+L):N ha sido encontrado para ser el índice más indicado para predecir la pérdida y liberación de N en la mayoría de los sistemas agroforestales (Melillo *et al.* 1989).

El objetivo principal del desarrollo de estos índices es la identificación de parámetros que predigan la descomposición y la liberación de nutrientes. Estos índices pueden también facilitar la investigación de árboles en Agroforestería para aumentar la capacidad del suministro de nutrientes y el mejoramiento del ciclaje de los mismos. Además, los índices se podrían utilizar para modelar los cambios de la fertilidad del suelo, inclusive la dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas donde la poda de material vegetal se aplican como una fuente de nutrientes durante un periodo de tiempo (Mafongoya *et al.* 1998).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Liberación del Nitrógeno del material foliar y radicular

3.1.1. Descripción del sitio de muestreo

Para este estudio se realizó la recolección del material vegetal de diferentes sistemas agroforestales con café situados en el Cantón de Pérez Zeledón (09°20'28" Latitud Norte y 83°44'26" Longitud Oeste), en el sitio San María ubicado en el Distrito de Cajón y en las fincas Verde Vigor y San Pedro, localizados a 20 km y 30 km al sur de la ciudad de San Isidro del General. Los sistemas agroforestales de estas localidades se ubican en una altitud entre los 600 y 700 msnm, con temperaturas promedio de 23°C, precipitación de 2736 mm año⁻¹ y 85% de humedad relativa (Tavares *et al.* 1999). En estas zonas se realizó la colecta de *E. poeppigiana* (EP), *E. deglupta* (ED), *I. edulis* (IE), *T. amazonia* (TA), *T. ivorensis* (TI) y *C. arabica* (C).

En el Cantón de Turrialba en el Ensayo de Sistemas Agroforestales, en la finca experimental de CATIE (9°53' Latitud Norte y 83°34' Longitud Oeste) y una elevación de 600 msnm, se realizó la recolección de material vegetal de *C. alliodora* (CA). Para la zona los datos meteorológicos de la estación de CATIE indican los siguientes promedios: precipitación 2651 mm año⁻¹, temperatura 21.8°C, humedad relativa de 88% y radiación solar de 16.9 Mj m² (De Melo *et al.*, 2002). La recolección del material vegetal de la especie *I. densiflora* (ID), se realizó en el Centro de Investigaciones del Café (CICAFE) localizado en San Pedro de Barva en el Cantón de Heredia (10°03' Latitud Norte y 84°13' Longitud Oeste). CICAFE, se encuentra situado a 1190 msnm, precipitación de 2321 mm/año, temperatura promedio de 22°C y humedad relativa de 80.

3.1.2. Tratamientos

Se evaluó la mineralización del N en el suelo, a partir de los siguientes tratamientos: hojas verdes de las especies EP e IE, hojarasca de las especies CA, ED, EP, ID, IE, TI, TA, C; raíces de las especies CA, ED, EP, ID, IE, TI, TA y C. Todos los tratamientos fueron mezclados con suelo. El testigo fue el suelo solo (S). Se seleccionaron hojas verdes de EP e IE debido a que son especies frecuentemente incorporadas en los sistemas cafetaleros como árboles de servicio, los cuales son podados frecuentemente para aumentar la biomasa del suelo e incorporar nutrientes al sistema. Igualmente, se seleccionaron las especies maderables por ser las que más frecuentemente se

encuentran en los cafetales de Costa Rica, debido a que aportan materia orgánica al suelo mediante la descomposición de su hojarasca y raíces.

3.1.3. Muestreo y análisis de datos

La mineralización del N en el suelo a partir de los materiales vegetales seleccionados fue evaluada mediante incubación aeróbica en laboratorio. La selección de estos tres componentes (hojas verdes, hojarasca y raíces) se hizo con el fin de buscar diferencias entre ellos. De hecho, se sabe que los tejidos verdes son más ricos en carbohidratos y proteínas y que los tejidos leñosos presentan mayores contenidos fenólicos (ligninas) y celulosa, sin embargo la composición bioquímica de los residuos vegetales varía de acuerdo con su edad y funciones del órgano analizado (Fassbender 1993).

Para tal efecto, 500 gr de cada componente fueron colectados, las hojas verdes de EP e IE se tomaron directamente de los árboles y la hojarasca de CA, ED, EP, IE, ID, TA, TI y C fue cosechada fresca, recién caída sobre el suelo, entre los meses de febrero a abril, los cuales coincidieron con la época seca de los sitios muestreados. Para el muestreo de raíces finas, se despejó el suelo de hojarasca y materiales en descomposición, para facilitar la obtención de las raíces. Se tomó una raíz gruesa de cada especie desde el tocón hasta encontrar raíces finas, muestreando hasta una profundidad de 10 cm, esto con el fin de garantizar que las raíces extraídas correspondieran a las especies seleccionadas. Se recolectaron raíces finas < de 2 mm de diámetro.

Los materiales fueron mezclados homogéneamente y secados al aire durante 5 días y posteriormente al horno a 60°C hasta peso constante. Posteriormente cada material fue molido utilizando un molino con malla de 0.25 mm. El suelo utilizado fue clasificado como un Inceptisol, y colectado de los primeros 15 cm de profundidad y proveniente de un cafetal manejado orgánicamente de la finca experimental en el CATIE, el cual fue limpiado de hojas y raíces y pasado por un tamiz de 2 mm. Las características químicas del suelo fueron las siguientes: pH 4.8 (en agua), 4.2% de C y 0.40% de N total, 11.5, 11.4, 3.2, 22 y 164 mg l⁻¹ de P, Cu, Zn, Mn y Fe; 2.77, 0.66, 0.12 cmol(+) l⁻¹ de Ca, Mg y K respectivamente.

De este suelo se tomaron 70 g para cada tratamiento, los cuales fueron mezclados con 0.70 g de material vegetal seco y molido, los cuales fueron colocados en bolsas plásticas y agitadas para que la mezcla fuera homogénea (Figura 1). Posteriormente se colocó la mezcla en vasos plásticos de

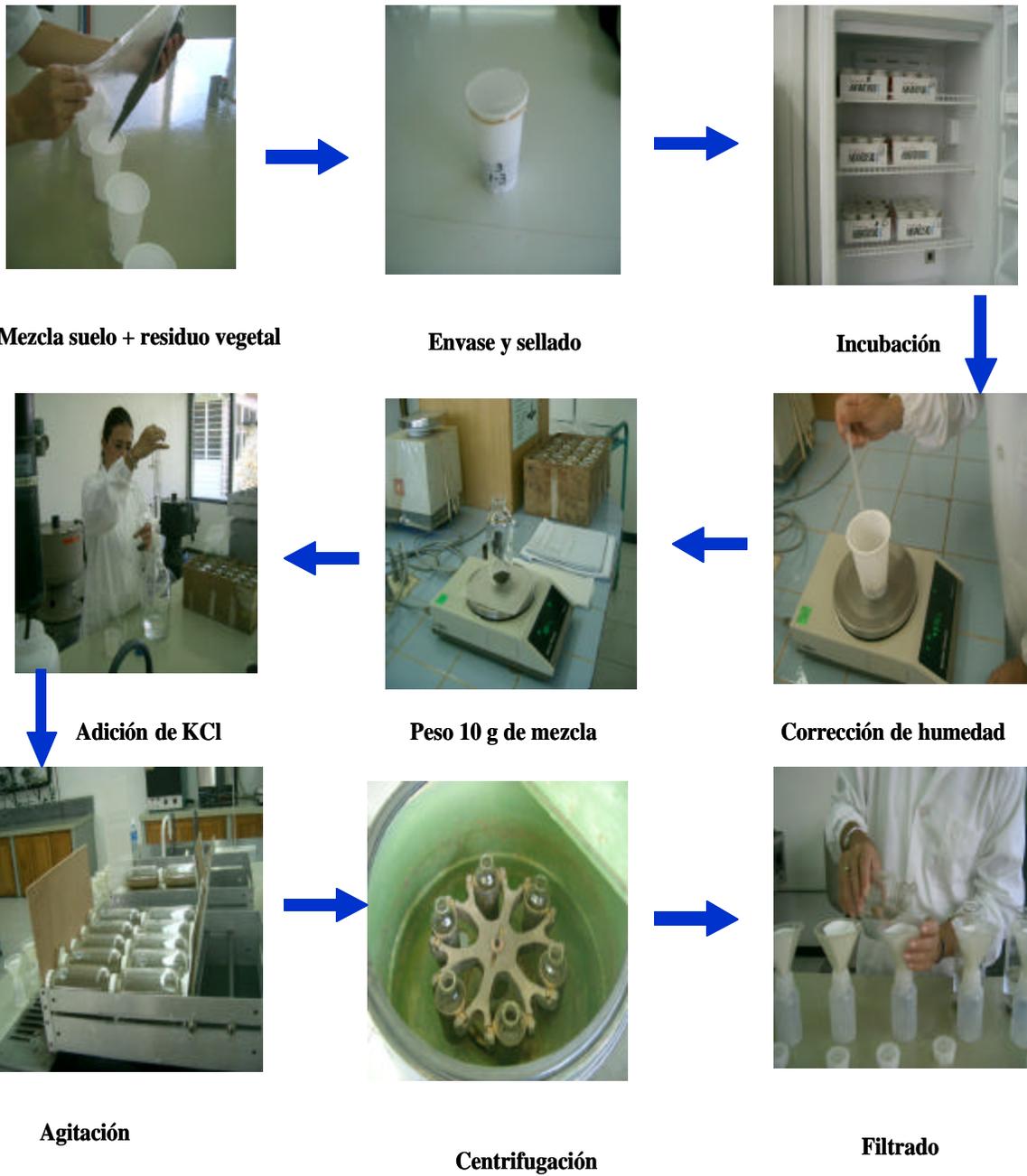


Figura 1. Mineralización del N en mezcla de suelo con material vegetal de siete especies de sombra, en una incubación de ocho semanas. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2004.

266 ml, los cuales fueron tapados con papel parafilm semipermeable para permitir el intercambio gaseoso. Los recipientes fueron colocados dentro del incubador a una temperatura de 28°C. Cada tratamiento fue replicado 4 veces.

El contenido de humedad fue reajustado por peso semanalmente agregando agua destilada para corregir las pérdidas de humedad.

Todos los tratamientos fueron evaluados a los 0, 1, 3, 5 y 8 semanas. Las muestras de la mezclas suelo-material vegetal obtenidas en cada fase de evaluación fueron analizadas para determinar el contenido de N mineral. De esta manera, 10 g de la mezcla fueron agitados con 100 ml de KCl 2N en un agitador durante 1 hora y centrifugados por 5 minutos. La solución resultante fue filtrada y analizada por el método colorimétrico, utilizando un autoanalizador ALLIANCE Integral Futura para determinar el contenido de N-NH₄ y N-NO₃.

Los datos obtenidos se analizaron con la ayuda del paquete estadístico Statistical Systems para Windows V8 (SAS V8). El nivel de significancia utilizado en las pruebas estadísticas realizadas fue 95% ($\alpha=0.05$). Para comparar la media del testigo con la media de las especies se usó la prueba de Tukey. Para este análisis se utilizó el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{k(i)} + T_j + ?T_{ij} + e_{k(ij)}$$

Donde:

Y_{ij} : Variable respuesta

μ : Media

α_i : efecto de la i-ésima especie

$e_{k(i)}$: Error debido a la especie

T_j : efecto de la j-ésima medición en el tiempo

$?T_{ij}$: interacción de la i-ésima especie con la j-ésima medición

$e_{k(ij)}$: error debido a las mediciones en el tiempo.

Además, se realizaron regresiones lineales, cuadráticas, cúbicas y exponenciales con el fin de determinar cuál modelo de regresión se ajustaba más a la curva, empleando para ello el análisis de varianza así como los valores calculados: a (intercepto) y b (coeficiente de regresión).

3.2. Efectos de la descomposición de material vegetal en el crecimiento inicial de plantas de maíz

3.2.1. Muestreo y análisis de datos

Para este estudio se tomaron los mismos tratamientos del estudio de mineralización, descritos en el punto 3.1.2, a excepción del tratamiento raíz ID. Inicialmente, se colectaron 500 g por tratamiento de los siguientes materiales vegetales:

- ?? Hojas Verdes de las especies EP, IE
- ?? Hojarasca de las especies ID, CA, ED, TI, TA y C
- ?? Raíces de las especies CA, ED, TI, TA y C

Cada material a evaluar fue secado inicialmente al aire y posteriormente al horno a 60 °C hasta peso constante. Posteriormente el material vegetal de estas especies fue molido en un molino con malla de 0.25 mm. Para cada tratamiento se mezclaron 8 g de material vegetal (hojas verdes, hojarasca y raíces) con 300 g de suelo con las mismas características químicas utilizado en el estudio de la mineralización.

Cada tratamiento estuvo conformado por 3 macetas (repeticiones) en las cuales se sembraron 4 semillas de maíz por maceta. Tres días después de haber germinado las semillas, se seleccionaron al azar 2 plantas de maíz. El cultivo duró 1 mes en evaluación bajo invernadero, tiempo durante el cual se midió el número de hojas y la altura de las plantas. Al cabo de los 30 días se cortaron y se pesaron por separado la parte aérea y la parte radical. Posteriormente fueron secadas al horno a 60°C hasta obtener peso constante. Luego se tomaron muestras representativas en cada tratamiento, los cuales fueron llevados al laboratorio de CATIE para determinar el contenido de N total (Figura 2).

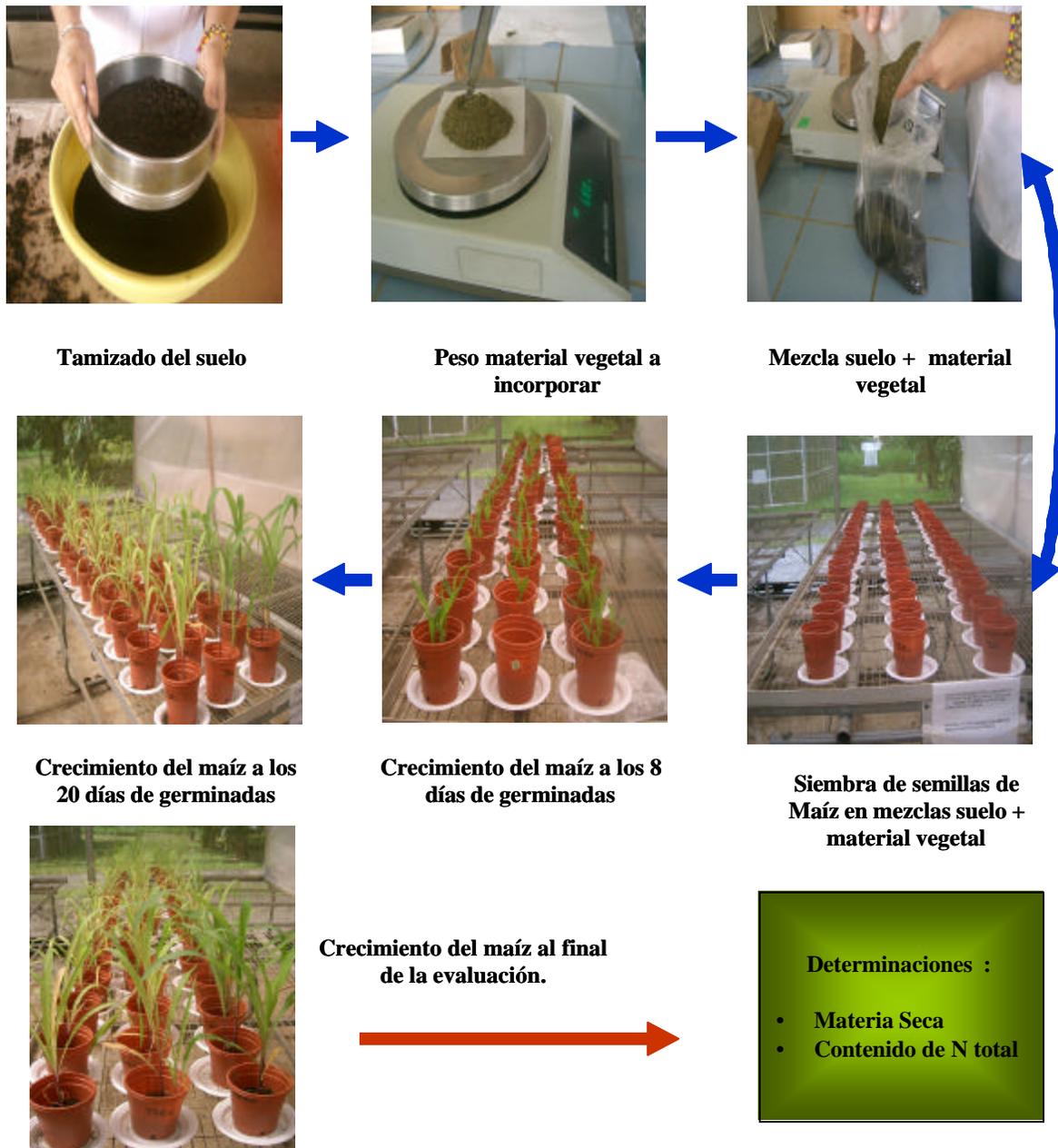


Figura 2. Efecto de la mineralización del N en mezcla de suelo con material vegetal de siete especies en el crecimiento inicial del maíz a nivel de invernadero durante 32 días. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

3.2.2. Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. Se realizó análisis de varianza, pruebas de comparación de medias y prueba de correlación utilizando el coeficiente de Pearson, empleando el paquete estadístico Statistical Systems para Windows V8 (SAS V8).

3.3. Estudio de descomposición de material foliar y radicular de las especies *Inga densiflora* y *Coffea arabica*

3.3.1. Descripción del sitio de muestreo

El estudio fue llevado a cabo en el Centro de Investigaciones del café CICAPE, localizado en San Pedro de Barva en el Cantón de Heredia (10°03' Latitud Norte y 84°13'), situado a 1190 msnm y presenta generalmente una precipitación de 2321 mm año⁻¹, temperatura promedio de 22°C y humedad relativa de 80%. El estudio fue iniciado el 6 de mayo de 2004 y finalizó en septiembre 10 del mismo año, período que correspondió a la estación lluviosa del año (Figuras 3 y 4).

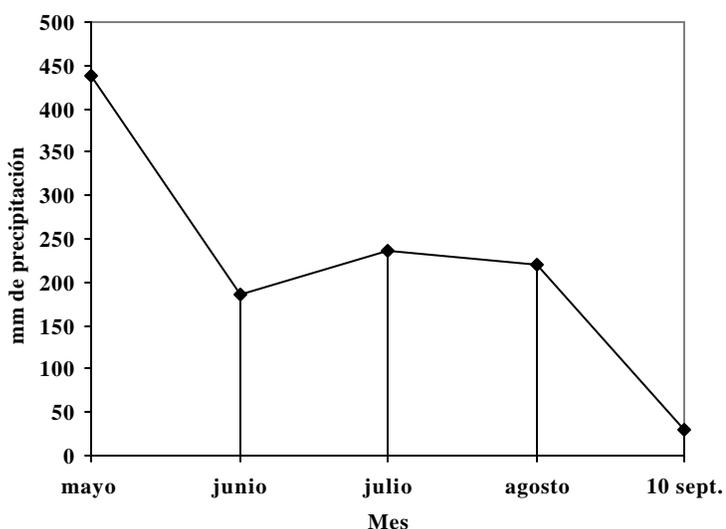


Figura 3. Precipitación mensual en la zona de estudio durante el periodo de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

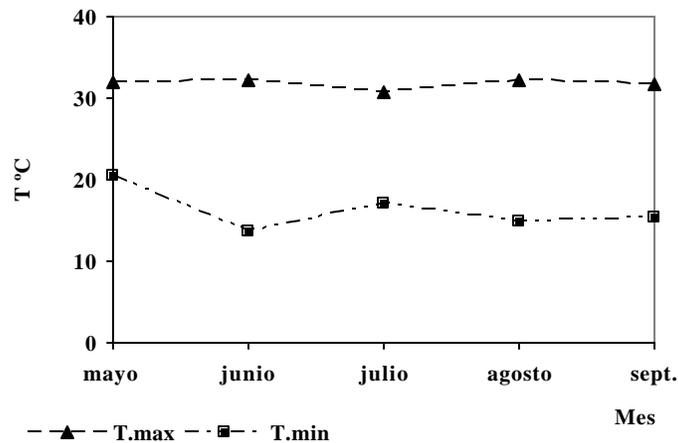


Figura 4. Temperatura mensual registrada durante el periodo de evaluación. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, 2004.

El sistema agroforestal ID y C ubicado en CICAFFE, fue establecido en el año de 1997, en un área de 1300 m². La variedad de café es la Catuaí y es el resultado del cruce entre el Mundo Novo y el Caturra, con el fin de reunir en una sola variedad las características agro-productivas en una planta de porte pequeño como el Caturra. Las distancias de siembra fueron de 2 m entre calles y 1 m entre planta para el *C. arabica* y de 6 m entre calle y 6 m entre plantas para *I. densiflora*. Con respecto al manejo del sistema, se realizan tres fertilizaciones al año, en los meses de mayo y agosto, donde se aplican 500 kg de fórmula completa 18-3-10-8-1,2 (N, P, K, Mg y B) en cada aplicación y en el mes de Noviembre se aplican 210 kg de NH⁴NO₃.

3.3.2. Muestreo y análisis de datos

La descomposición y liberación de N del material foliar y radicular fueron evaluados mediante la metodología de bolsas de descomposición (Lousier y Parkinson 1975, Weider and Lang 1982, Lehmann *et al.* 1995), para lo cual se seleccionaron 4 árboles de ID bajo los cuales se establecieron los 4 tratamientos (hojarasca y raíces de ID y C). Para tal efecto, hojarasca de cada uno de los materiales a evaluar y raíces (< 2 mm), fueron cosechados de las especies seleccionadas, mezclados homogéneamente y secados inicialmente al aire y posteriormente al horno a 60°C hasta peso constante. Seguidamente 10 gr de hojarasca de cada material fueron ubicados dentro de bolsas nylon de 30 x 30 cm y conformadas de una malla de 2 mm en la parte inferior, la cual estuvieron en contacto con la superficie del suelo, lo cual permitió evitar la pérdida de partículas o residuos del material vegetal producto de la descomposición y una malla superior de 5 mm que permitió el acceso de la macrofauna del suelo (Figura 5).



Figura 5. Proceso de descomposición de la hojarasca de las especies *I. densiflora* y *C. arabica*. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Las bolsas fueron cubiertas con una malla galvanizada con un tamaño de agujero de 25 mm² asegurado en el suelo por medio de varillas de acero para evitar daños de animales. Para las raíces se utilizaron bolsas de 10 x 10 cm de acero inoxidable con una malla de 4 mm. En cada una de ellas se colocó 1 g de raíces, los cuales fueron distribuidos uniformemente dentro de la bolsa para facilitar la descomposición. Posteriormente estas bolsas fueron enterradas a 10 cm de profundidad con el fin de simular condiciones naturales. Todas las bolsas fueron previamente marcadas con una lámina de aluminio numerada (Figura 6). Una submuestra de cada material foliar y radicular fue utilizada para determinar C y N inicial.

Se utilizaron en total 20 bolsas por cada especie (4 grupos de 5 bolsas), correspondientes a evaluaciones en el tiempo (2, 4, 6, 12 y 18 semanas) y 4 repeticiones por evaluación (Figura 7). En cada evaluación se recolectó una bolsa de cada tratamiento y repetición, la cual se introdujo en una bolsa plástica para ser trasladada al laboratorio de suelos del CATIE, donde el material foliar y radicular de la bolsa fue eliminado de materiales extraños y limpiados de partículas de barro adheridas. Posteriormente el material vegetal fue secado al horno a 60°C hasta peso constante con el fin de determinar su peso seco y su contenido de C y N remanente. La descomposición y la liberación de C y N del material foliar y radicular de las especies fue evaluada mediante la pérdida de peso y N de los materiales respectivos

A cada tiempo de evaluación, se determinó el porcentaje de peso seco remanente o del nutriente. Para determinar las diferencias significativas entre las muestras obtenidas en el periodo de evaluación se utilizó un análisis de varianza.

Las diferencias entre muestras se hallaron con el test de diferencias mínimas significativas (LSD). Cada árbol seleccionado se consideró una parcela y las fechas de muestreo fueron tomadas como tratamientos. Los datos obtenidos se analizaron con la ayuda del paquete estadístico Statistical Systems para Windows V8 (SAS V8). El nivel de significancia utilizado en las pruebas estadísticas realizadas fue 95% ($\alpha=0.05$). Todas las variables de descomposición y liberación de N fueron determinadas mediante análisis de regresión entre las medias de las variables peso seco remanente (PSR) y nitrógeno remanente (NR) contra el tiempo, para cada especie.

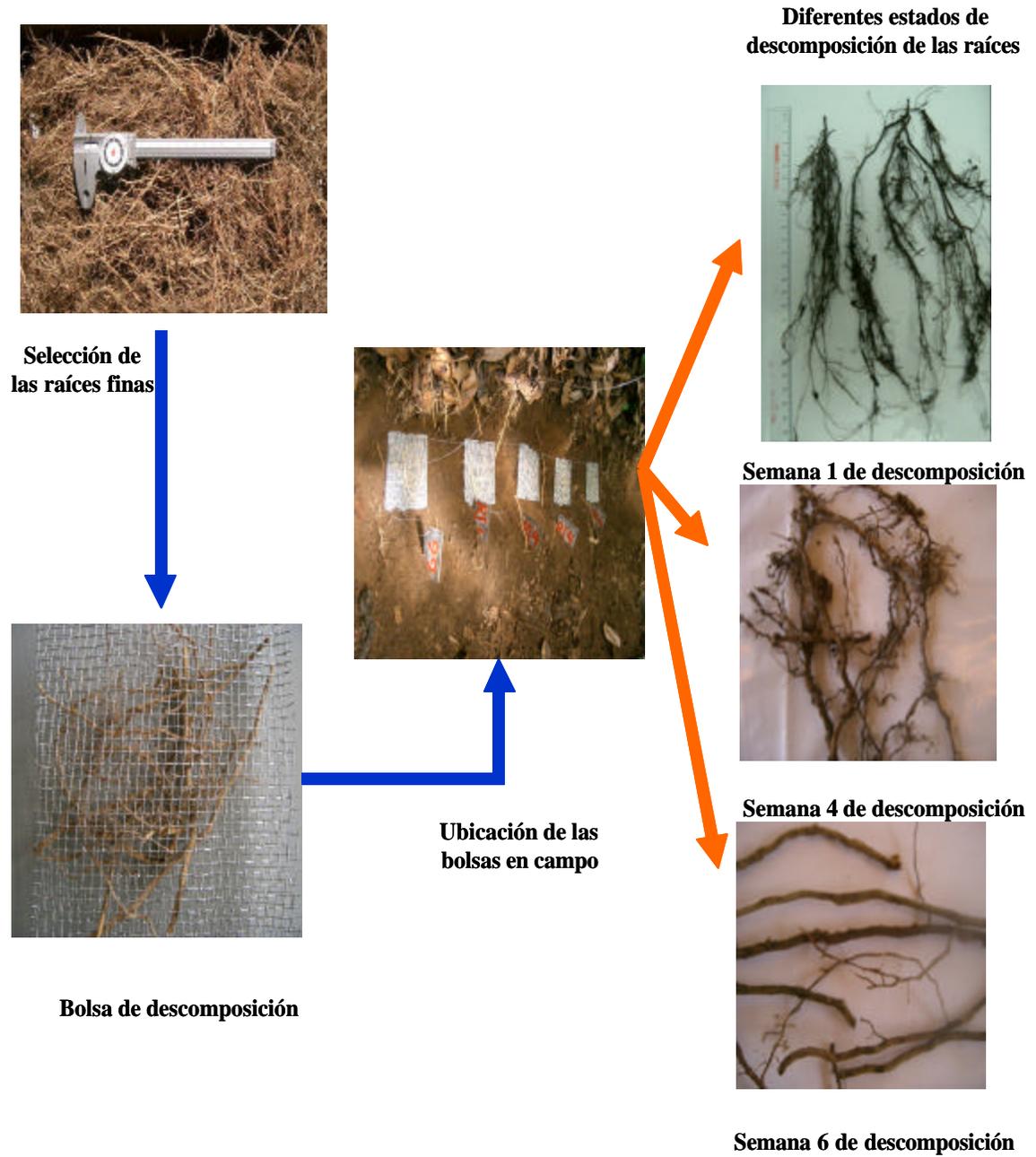


Figura 6. Proceso de descomposición de las raíces finas de las especies *I. densiflora* y *C. arabica*. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

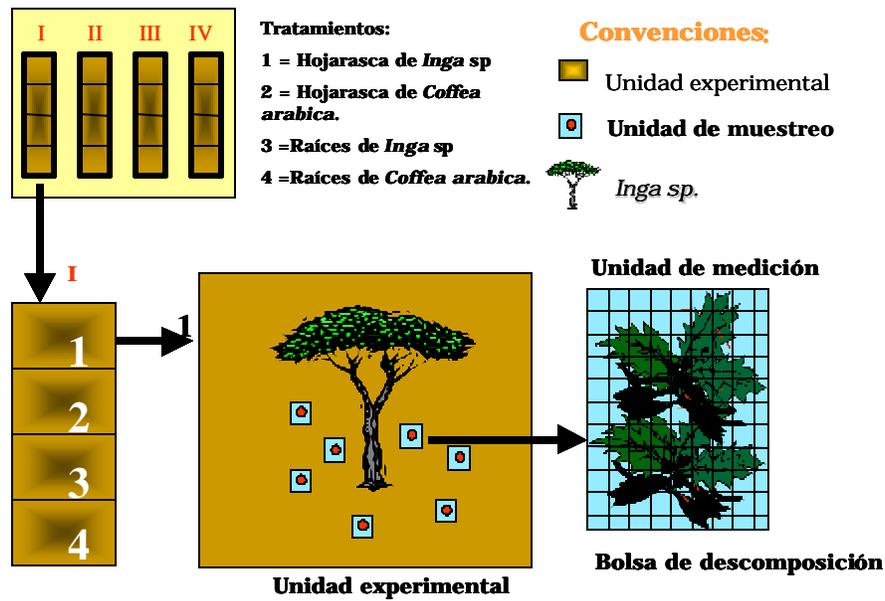


Figura 7. Distribución de bolsas de descomposición en el sistema agroforestal. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Para el análisis se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{jk} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

μ = Media

α_i = efecto de bloques (parcela *I. densiflora* - *C. arabica*)

β_j = efecto de los tratamientos de descomposición

γ_k = error exponencial

$\alpha\beta$ = efecto de las fechas de recolección de las bolsas de descomposición

$(\alpha\beta)_{jk}$ = es el efecto de la interacción tratamientos de descomposición por fechas de recolección.

ϵ_{ijk} = error de muestreo

IV. RESULTADOS

4.1. Liberación del nitrógeno del material foliar y radicular

La concentración de nitrógeno (N) inicial en las hojas verdes de las especies leguminosas fue de 3.88% para EP, la cual fue muy similar a la concentración de N presente en las hojas verdes de IE con 3.75%. El valor de EP fue superior al reportado por Palm y Sánchez (1991) con una concentración de 3.52%. En la hojarasca, la concentración de N varió de 1.03% en TA hasta 2.57% en EP, mientras que en las raíces varió de 0.73% en ED hasta 1.98 % en EP. Las altas concentraciones de N en los materiales iniciales han sido generalmente relacionadas con altas tasas de descomposición (Domínguez *et al.* 1995, Kreshnar y Montagnini 1998) y mineralización de N (Tian *et al.* 1997, Constantinides y Fownes 1994).

4.1.1. Patrones de mineralización de N

Los patrones de mineralización de las hojas verdes de EP e IE fueron diferentes al patrón del testigo mientras que la hojarasca y raíces para las otras especies presentaron resultados variables con respecto al patrón del testigo. El análisis de varianza entre los diferentes tratamientos presentó diferencias altamente significativas. El Anexo 1, muestra los promedios de mineralización acumulada del N obtenidos durante las ocho semanas de incubación en los diferentes tratamientos. En el testigo, la mineralización acumulada durante ocho semanas de incubación fue de 132 mg N por kg de suelo, superando los contenidos de la mayoría de los tratamientos de hojarasca y raíces.

La Figura 8 y el Anexo 2, muestra el comportamiento del N mineralizado en las hojas verdes de las especies leguminosas. En el caso de la especie EP, esta presentó los contenidos de N mineral más altos en el tratamiento hojas verdes (HVEP), aumentando de 55.4 a 132.74 mg N kg⁻¹ de suelo, seguido por sus raíces (REP) quienes incrementaron desde 26.5 a 49.6 74 mg N kg⁻¹, superando los contenidos obtenidos por el testigo (S), mientras que la hojarasca (HJEP) presentó los niveles más bajos sin superar al testigo. El tratamiento de hojas verde de IE (HVIE) presentó una mineralización que aumentó de 49.5 a 177.9 74 mg N kg⁻¹ de suelo y una mineralización acumulada de 384.2 74 mg N kg⁻¹ de suelo, muy similar a la presentada por HVEP (395.6 74 mg N kg⁻¹ de suelo). Aunque los tratamientos restantes (hojarasca y raíces) presentaron una baja mineralización, mostrando una tendencia parecida a la del testigo.

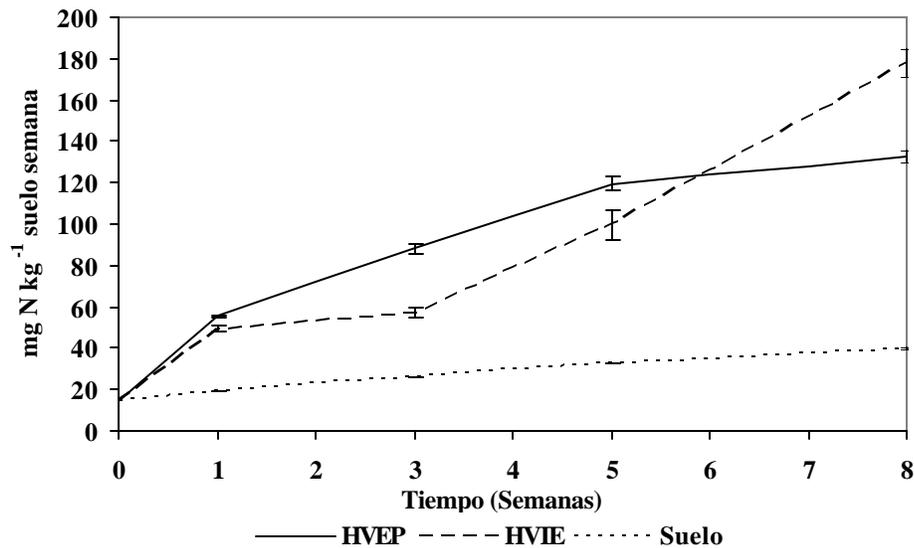


Figura 8. Patrones de mineralización de N presentada por el tratamiento hojas verdes de *E. poeppigiana* e *I. edulis*, en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

En la Figura 9 y el Anexo 3, se puede observar la mineralización del N que presentó la hojarasca de las especies leguminosas y maderables en evaluación. En la especie ID (HJID) se presentó una mineralización que comenzó con 23.5 mg N kg⁻¹ de suelo, muy similar al patrón del testigo, en la cual ambos tratamientos aumentaron hasta la 5 semana de incubación. A partir de esta semana los contenidos de N mineral incrementaron superando al testigo, hasta llegar a 70.1 mg N kg⁻¹ de suelo.

La hojarasca de CA (HJCA) y TA (HJTA), presentaron una mayor mineralización al inicio de la evaluación de 14.1 y 17.6 mg N kg⁻¹ de suelo respectivamente, para posteriormente disminuir al final de la incubación.

Las especies TI y ED presentaron un comportamiento similar, puesto que a la semana 1 de incubación los tratamientos mineralizaron muy poco, para posteriormente disminuir de manera tal que luego de la semana 3 sus concentraciones fueron casi nulas, situación que permaneció más o menos constante hasta el final de la evaluación, presentando un comportamiento muy diferente al del testigo. En el caso de la hojarasca de café (C), esta presentó una pérdida de N hacia la semana 3, indicando una aparente inmovilización. A partir de allí incrementó levemente hasta finalizar la incubación, pero presentando siempre valores inferiores a las raíces y el suelo solo.

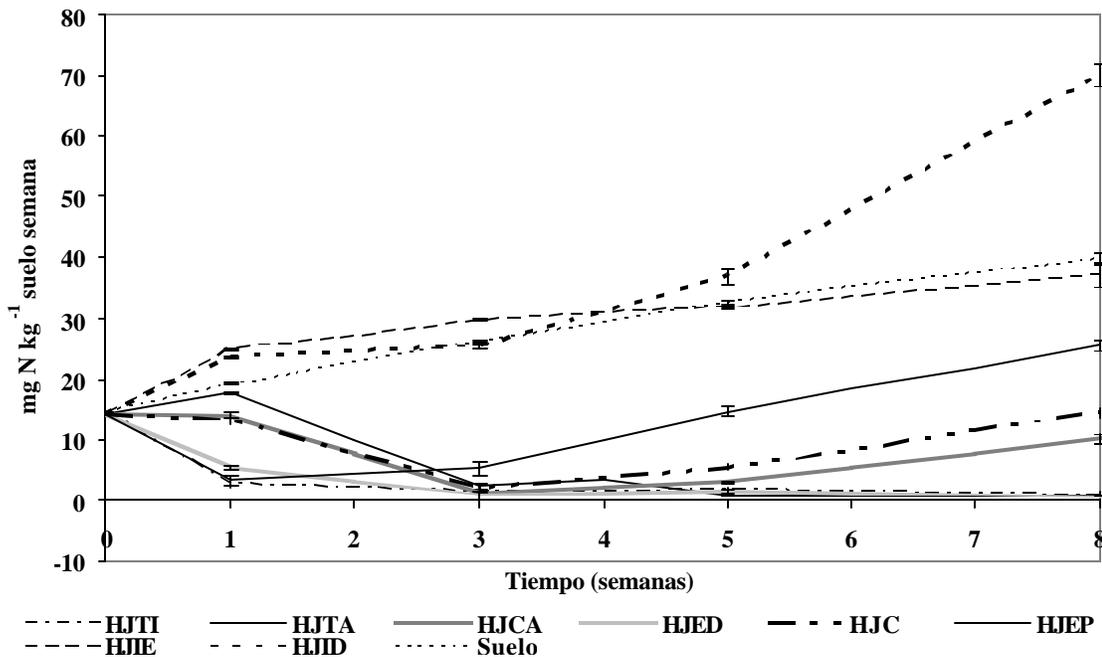


Figura 9. Patrones de mineralización de N presentada por las hojarascas de las especies leguminosas y maderables en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

La Figura 10 y el Anexo 4, muestra el comportamiento de las raíces de los diferentes tratamientos durante las semanas evaluadas en incubación. Con respecto a las raíces de ID, estas mineralizaron en la semana 1, 26 mg N kg⁻¹ de suelo, superando los contenidos iniciales de la hojarasca y el suelo para posteriormente presentar un decrecimiento en el N mineral en las semanas 3 y 5 de incubación. A partir de esta última semana y hasta la semana 8 incrementó en 29 mg N kg⁻¹ de suelo sin superar los contenidos del testigo.

Las raíces de especies CA (RCA) y TA (RTA) mineralizaron más que en las hojarascas. Siendo superior el tratamiento CA, quien a la semana 1 mineralizó 71.3 1 mg N kg⁻¹ de suelo e incrementó en la semana 8 en 73.7 1 mg N kg⁻¹ de suelo, superando los contenidos del testigo y los contenidos de los otros tratamientos. Los patrones de mineralización en las raíces de café, presentaron una tendencia muy similar a la del testigo (suelo solo) sin superarlo.

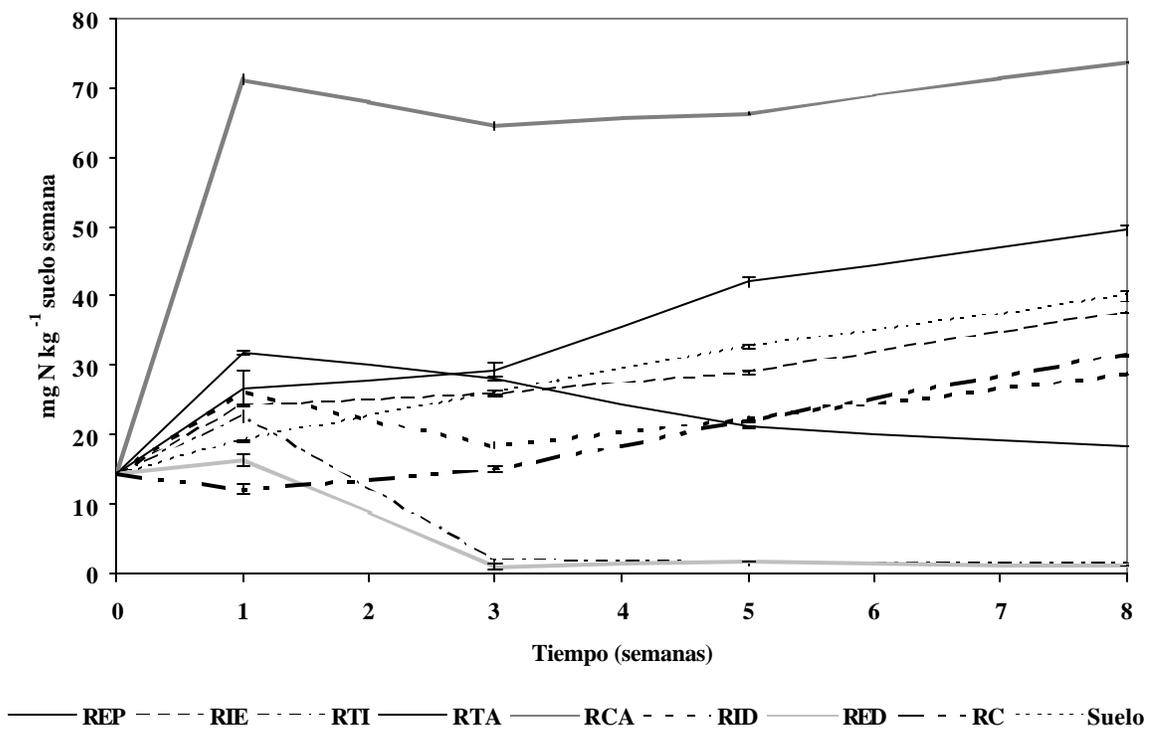


Figura 10. Patrones de mineralización de N presentados por las raíces finas de las especies leguminosas y maderables en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

4.1.2. Tasas de mineralización semanal en las hojas verdes de especies leguminosas *E. poeppigiana* e *I. edulis*

Las tasas semanales de mineralización de los diferentes tratamientos fueron calculadas para 4 tiempos (semanas 1, 3, 5 y 8), para lo cual en el intervalo de cada tiempo se hizo la diferencia entre el N mineralizado entre la última y la primera semana y posteriormente este valor fue dividido en el número de semanas involucradas dentro de cada intervalo de tiempo. El análisis de varianza para las diferentes especies presentó diferencias altamente significativas para las variables tasa promedio, tasa 1, 3, 5 y 8 (Tabla 1). Se puede observar que los tratamientos que presentaron mayor mineralización promedio fueron HVIE y HVEP, seguidos de RCA.

Tabla 1. Tasa promedio de mineralización de N y tasas por semana para cada especie en ocho semanas de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamientos	Tasa promedia	Tasa 1*	Tasa 3*	Tasa 5*	Tasa8*
HVIE (<i>Inga edulis</i>)	21.60 a	35.25 c	3.84 b	21.21 a	26.09 a
HVEP (<i>Erythrina poeppigiana</i>)	19.40 b	41.13 b	16.26 a	15.79 b	4.41 c
RCA (<i>Cordia alliodora</i>)	14.22 c	56.80 a	-3.31 gh	0.94 defg	2.44 de
HJID (<i>Inga densiflora</i>)	6.74 d	9.20 ef	0.96 ed	5.71 cd	11.07 b
REP (<i>E. poeppigiana</i>)	5.61 d	12.15 e	1.39 cde	6.36 c	2.54 de
HJIE (<i>I. edulis</i>)	3.93 e	10.48 e	2.39 bcd	1.14 cdefg	1.73 e
RIE (<i>I. edulis</i>)	3.79 e	9.85 e	0.89 de	1.51 cdefg	2.90 cde
S (<i>Suelo</i>)	3.49 e	4.75 fg	3.51 bc	3.26 cdef	2.42 de
RID (<i>Inga densiflora</i>)	3.00 e	11.68 e	- 3.81 gh	1.96 cdef	2.19 de
RTA (<i>Terminalia amazonia</i>)	2.81 ef	17.53 d	-1.85 fg	-3.58 g	-0.88 f
RC (<i>Coffea arabica</i>)	1.48 f	-2.23 ij	1.4 cde	3.54 cdef	3.19 cde
HJEP (<i>E. poppigiana</i>)	-0.42 g	-10.98 k	0.95 de	4.75 cde	3.61 cd
RTI (<i>Terminalia ivorensis</i>)	-0.69 g	8.33 ef	-10.45 k	-0.19 efg	-0.45 f
HJC (<i>C. arbica</i>)	-0.73 g	-2.98 j	-4.60 hi	1.63 cdefg	3.05 cde
HJCA (<i>C. alliodora</i>)	- 0.85 g	-0.20 hij	-6.45 ij	0.88 defg	2.38 de
HJTA (<i>T. amazonia</i>)	- 1.40 gh	3.28 gh	-7.6 j	-0.86 fg	-0.22 f
RED (<i>Eucalyptus deglupta</i>)	- 1.39 gh	2.03 ghi	-7.71 j	0.35 efg	-0.21 f
HJED (<i>E. deglupta</i>)	-2.80 hi	-8.90 k	-2.33 fgh	0.35 defg	-0.27 f
HJTI (<i>T. ivorensis</i>)	-3.11 i	-11.55 k	-0.7 ef	0.19 efg	-0.40 f
Pr > f	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Valores con la misma letra por columna no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan, ($p < 0.05$)

*Tasa 1= N mineralizado entre el tiempo 0 y las primera semana

*Tasa 3= N promedio mineralizado entre la semana 1 y 3

*Tasa 5= N promedio mineralizado entre las semanas 3 y 5

*Tasa 8= N promedio mineralizado entre las semanas 5 y 8

Los tratamientos HJID y REP presentaron promedios similares, al igual que los tratamientos HJIE, RIE, S, RID y RTA, seguidos estos por RC. Los tratamientos que presentaron una mineralización negativa fueron HJEP, RTI, HJC, HJCA HJTA, RED, HJED y HJTI.

Para la tasa 1 de mineralización los mejores cinco resultados los presentaron los tratamientos RCA, HVEP, HVIE, RTA, REP, RID, HJIE y RIE, en la tasa 3 HVEP seguido de HVIE, en la tasa 5 fueron en su orden HVIE, HVEP y REP y en la tasa 8 los tratamientos HVIE, HJID y HVEP.

En la Tabla 2, se presentan las tasas de mineralización por semana de los tratamientos HVEP, HVIE y el testigo. Se observó que se presentaron diferencias altamente significativas para los tres tratamientos. HVEP presentó una tasa alta de mineralización en la primera semana de evaluación. Entre la primera y la quinta semana (tasas 3 y 5) se presentó una disminución en la tasa de mineralización, siendo una cantidad muy similar en este intervalo de tiempo, posteriormente continuó su disminución entre la quinta y octava semana de incubación.

La HVIE también presentó una tasa alta de mineralización en la primera semana pero disminuyó a la semana 3 de incubación. En las semanas 5 y 8 las tasas de mineralización aumentaron y fueron muy similares. Estas tasas presentadas por las hojas verdes de EP e IE superaron las tasas presentadas por el testigo. La Figura 8, muestra las tendencias presentadas por las tasas de mineralización de N en el tratamiento hojas verdes de las especies EP e IE y del suelo solo como testigo.

Tabla 2. Concentraciones de N foliar inicial y tasas de mineralización de N por semana de hojas verdes las especies *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Especie	%N inicial	Tasas promedio de mineralización de N (mg/kg)				Pr > f
			por semana				
			*1	*3	*5	*8	
Hojas Verdes	EP	3.88	41.13 a	16.26 b	15.79 b	4.41 c	< 0.0001
	IE	3.75	35.23 a	3.84 c	21.21 b	26.09 b	< 0.0001
Suelo (Testigo)		0.40	4.75 a	3.51 b	3.26 b	2.42 c	< 0.0001

Valores con la misma letra por fila no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan, ($p < 0.05$)

*Tasa 1= N mineralizado entre el tiempo 0 y las primera semana

*Tasa 3= N promedio mineralizado entre la semana 1 y 3

*Tasa 5= N promedio mineralizado entre las semanas 3 y 5

*Tasa 8= N promedio mineralizado entre las semanas 5 y 8

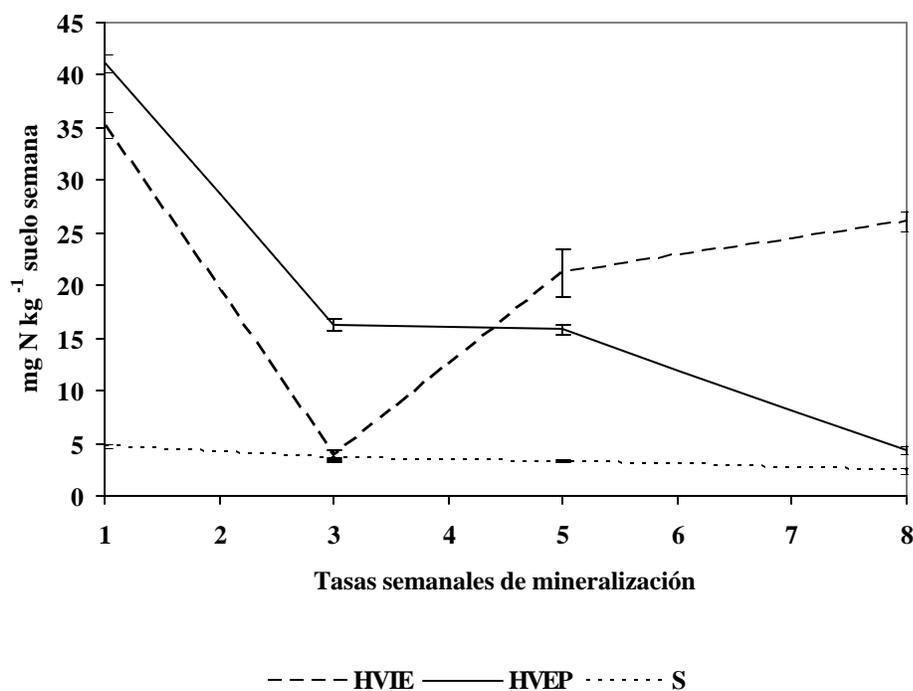


Figura 11. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por las especies *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

4.1.3. Tasas de mineralización semanal en la hojarasca de las especies leguminosas, maderables y el café

La Tabla 3, muestra las tasas de mineralización promedio por semanas de la hojarasca de las especies maderables, leguminosas, café y del suelo solo. Se observa que todos los tratamientos presentaron diferencias altamente significativas a través del tiempo.

En la hojarasca de las especies leguminosas, EP presentó una inmovilización en la primera semana de incubación pero a partir de esta, las tasas de mineralización se incrementaron, siendo similares y más altas entre las semanas 3 y 8 (tasas 5 y 8). IE tuvo una mineralización inicial alta con respecto a los otros tratamientos, pero esta decreció al final del tiempo de incubación (tasas 5 y 8), mientras que ID presentó una situación inversa a IE.

La hojarasca de las especies maderables, TI y ED presentaron valores negativos (inmovilización) desde el inicio hasta la tercera semana (tasa 1 y 3) y de la quinta a la octava semana (tasa 8), pero siendo positivos entre las semanas 3 y 5 (tasa 5). TA registró mineralización en la primera semana, pero en las semanas siguientes presentó una pérdida del N durante este periodo (tasas 3, 5 y 8), pudiendo ser resultado de una inmovilización. CA presentó valores negativos hasta la tercera

semana (tasas 1 y 3), pero valores positivos entre la tercera y octava semana (tasas 5 y 8). La hojarasca de C, presentó inmovilización en las tres primeras semanas (tasas 1 y 3), mientras que para las siguientes semanas se activó el proceso de mineralización (tasas 5 y 8). El suelo (S), mineralizó durante todo el tiempo de incubación, siendo mayor en las primeras 3 semanas.

Tabla 3. Concentraciones de N foliar inicial y tasas de mineralización de N por semana de las hojarascas de las especies *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y las especies maderables *T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *C. alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED), y *C. arabica* (C). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Especie	%N inicial	Tasas promedio de mineralización de N (mg/kg)				Pr > f
			por semanas				
			*1	*3	*5	*8	
Hojarasca Leguminosas	EP	2.57	-10.98 c	0.95 b	4.75 a	3.61 a	< 0.0001
	IE	2.27	10.48 a	2.39 b	1.14 c	1.73 bc	< 0.0001
	ID	2.62	9.2 b	0.96 d	5.7 c	11.07 a	< 0.0001
Hojarasca maderables	TI	1.11	-11.55 b	-0.7 a	0.19 a	-0.40 a	< 0.0001
	TA	1.03	3.28 a	-7.6 d	-0.86 c	-0.22 b	< 0.0001
	CA	2.16	-0.20 c	-6.5 d	0.88 b	2.38 a	< 0.0001
	ED	1.20	-8.9 d	-2.33 c	0.38 a	-0.27 b	< 0.0001
Hojarasca café	C	2.24	-2.98 c	-4.6 d	1.63 b	3.05 a	< 0.0001
Suelo (Testigo)		0.40	4.75 a	3.51 b	3.26 b	2.42 c	< 0.0001

Valores con la misma letra por fila no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan, ($p < 0.05$)

*Tasa 1= N mineralizado entre el tiempo 0 y las primera semana

*Tasa 3= N promedio mineralizado entre la semana 1 y 3

*Tasa 5= N promedio mineralizado entre las semanas 3 y 5

*Tasa 8= N promedio mineralizado entre las semanas 5 y 8

La Figura 12 muestra las tasas de mineralización del N entre especies leguminosas. En la semana 1 (tasa 1) la única especie que presentó inmovilización fue EP, mientras que en el resto de semanas (tasas 3, 5 y 8) hubo mineralización en todas las especies.

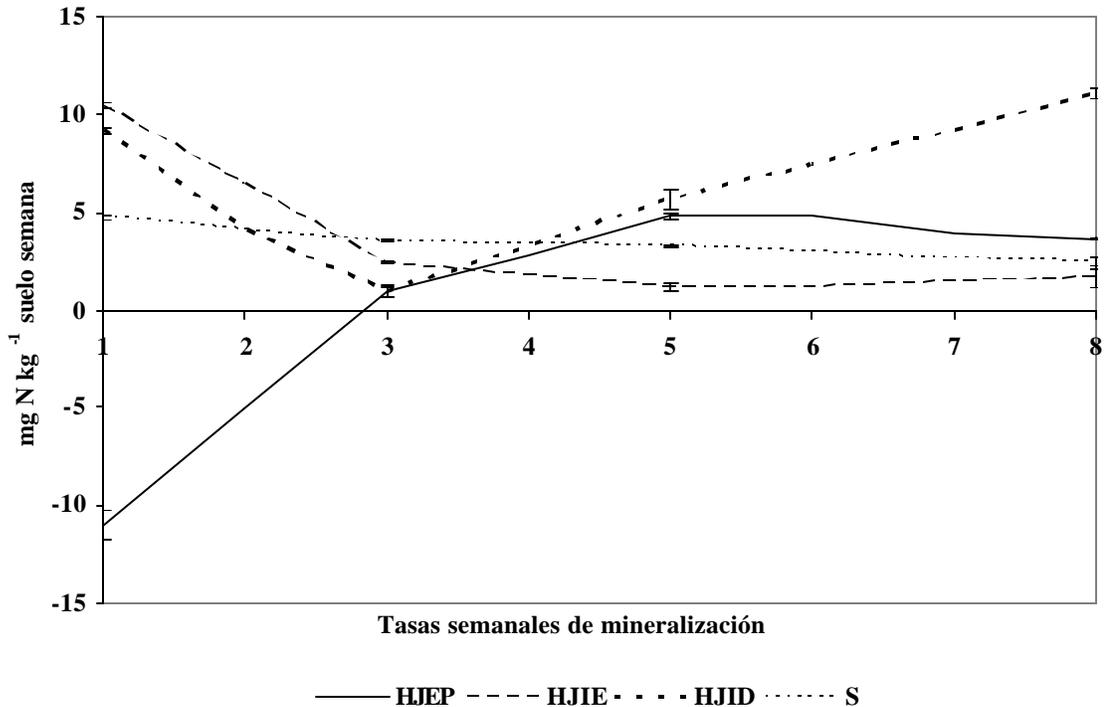


Figura 12. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por la hojarasca de las especies leguminosas *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

En la Figura 13, se observa que la única especie que no presentó inmovilización en la primera semana (tasa 1) fue TA, al igual que S, mientras que entre la primera y tercera semana (tasa 3) el N fue inmovilizado en todas las especies, pero no en el testigo.

Entre la tercera y quinta semana (tasa 5) el testigo y todas las especies mineralizaron a excepción de TA. Entre las semanas quinta y octava (tasa 8) se presentó mineralización en las especies CA y C, además del testigo, mientras que ED, TI y TA presentaron inmovilización.

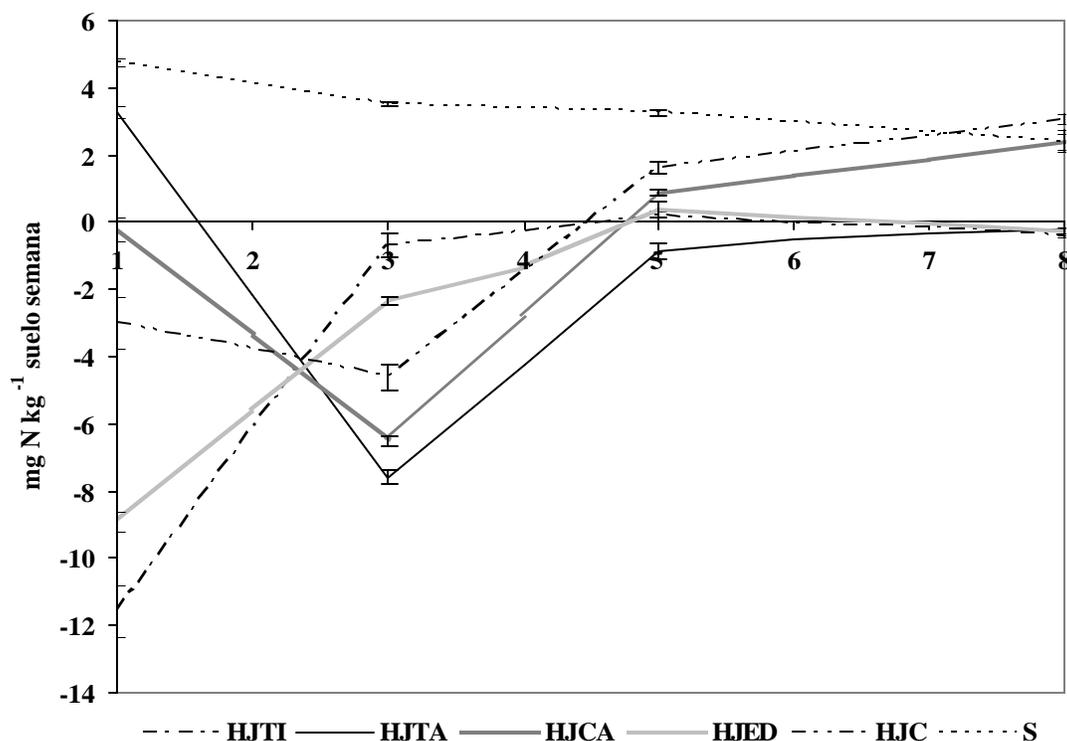


Figura 13. Tasas promedio de mineralización por semana de N presentadas por la hojarasca de las especies maderables *T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED) y *C. arabica* (C) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

4.1.4. Tasas de mineralización semanal en las raíces de las especies leguminosas, maderables y el café

En la Tabla 4 se observan las tasas de mineralización promedio por semana de las raíces de las especies maderables, leguminosas, café y del suelo solo. Se observa que todos los tratamientos presentaron diferencias altamente significativas a través del tiempo a excepción de REP que presentó diferencias significativas.

Las raíces de las especies leguminosas, EP e IE presentaron mineralización durante el tiempo de incubación siendo mayor en la primera semana (tasa 1) para ambas especies. ID mostró mayor mineralización en la primera semana (tasa 1), entre la primera y tercera semana (tasa 3) presentó inmovilización para luego mineralizar en las semanas restantes.

Tabla 4. Concentraciones de N inicial y tasas promedio de mineralización de N por semana de las raíces finas de las especies leguminosas *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y las especies maderables *T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *C. alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED) y *C. arabica*. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Especie	%N inicial	Tasas promedio de mineralización de N (mg/kg)				Pr > f
			por semana				
			1*	*3	*5	*8	
Raíces Leguminosas	EP	1.98	12.15 a	1.39 b	6.36 b	2.54 b	0.0016
	IE	1.82	9.85 a	0.89 c	1.51 c	2.9 b	<0.0001
	ID	1.03	11.68 a	-3.8 c	1.96 b	2.19 b	<0.0001
Raíces maderables	TI	0.81	8.33 a	-10.45 c	-0.19 b	-0.45 b	<0.0001
	TA	1.07	17.53 a	-1.85 c	-3.58 d	-0.88 b	<0.0001
	CA	1.71	56.8 a	-3.3 d	0.94 c	2.44 b	<0.0001
	ED	0.73	2.03 a	-7.7 c	0.35 b	-0.21 b	<0.0001
Raíces café	C	1.99	-2.22 c	1.4 b	3.54 a	3.19 a	<0.0001
Suelo (Testigo)		0.40	4.75 a	3.51 b	3.26 b	2.42 c	<0.0001

Valores con la misma letra por fila no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan, ($p < 0.05$)

*Tasa 1= N mineralizado entre el tiempo 0 y las primera semana

*Tasa 3= N promedio mineralizado entre la semana 1 y 3

*Tasa 5= N promedio mineralizado entre las semanas 3 y 5

*Tasa 8= N promedio mineralizado entre las semanas 5 y 8

En los tratamientos con raíces de las especies maderables, se observó que la especie TI y TA mineralizaron en la primera semana (tasa 1) de incubación, sin embargo en las semanas restantes de evaluación presentaron inmovilización. Las raíces de CA, presentaron una tasa alta de mineralización durante la primera semana y entre la primera y tercera semana (tasa 3) se presentó inmovilización, mientras que entre las semanas quinta y octava nuevamente mineralizó pero en menor grado. La especie ED mineralizó N en la primera y quinta semana y lo inmovilizó en la tercera y octava semana.

En las raíces de C hubo inmovilización del N en la primera semana de incubación, mientras que entre la primera y octava semana presentó mineralización del N, siendo similares las tasas 5 y 8. El testigo (S) presentó mineralización del N durante las 8 semanas de incubación, siendo las tasas mayores en las primeras semanas.

En la Figura 14, se observa que las raíces de las especies leguminosas mineralizaron en todo el periodo de estudio a excepción de ID quien en la tercera semana presentó una inmovilización del N.

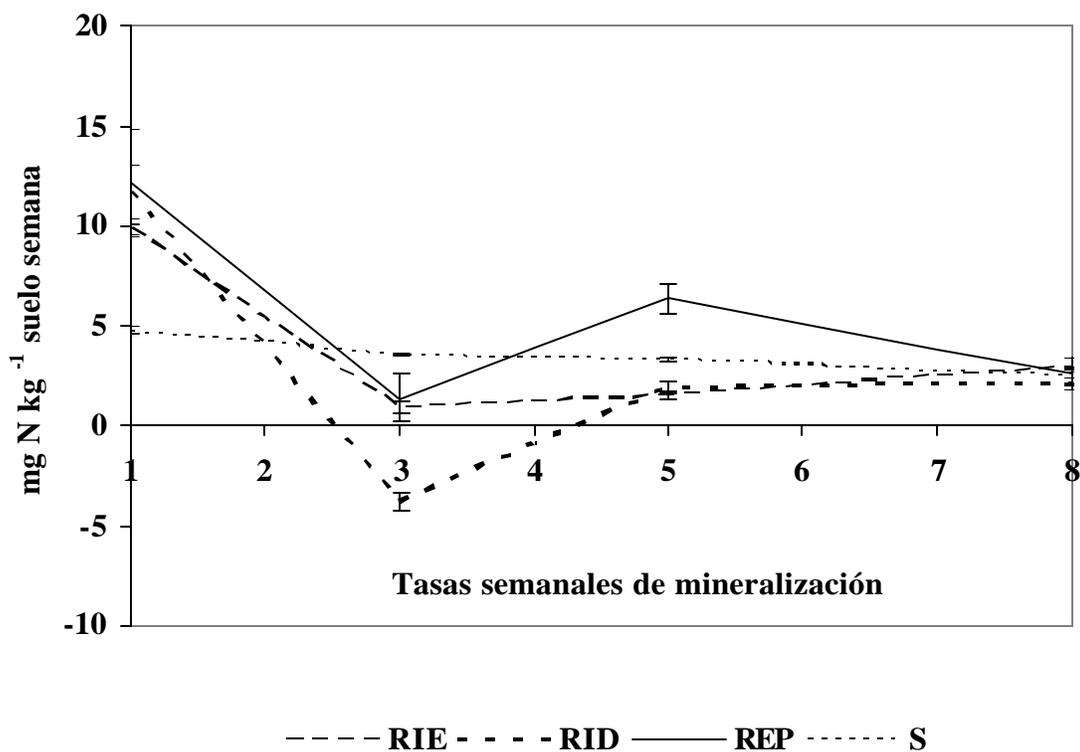


Figura 14. Tasas de mineralización por semana de N presentadas por las raíces de las especies leguminosas *E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

La Figura 15 muestra que la única especie que no presentó mineralización del N en la primera semana (tasa 1) fue C, mientras que entre la primera y tercera semana (tasa 3) el N fue inmovilizado en las especies TI, TA, CA y ED, presentándose mineralización del N en el resto de las especies, incluido el testigo. Entre la tercera y quinta semana (tasa 5) el testigo y todas las especies mineralizaron a excepción de TA. Entre las semanas quinta y octava (tasa 8) se presentó inmovilización del N en las especies TI, TA y ED, mientras que en el resto de las especies hubo mineralización, además del testigo.

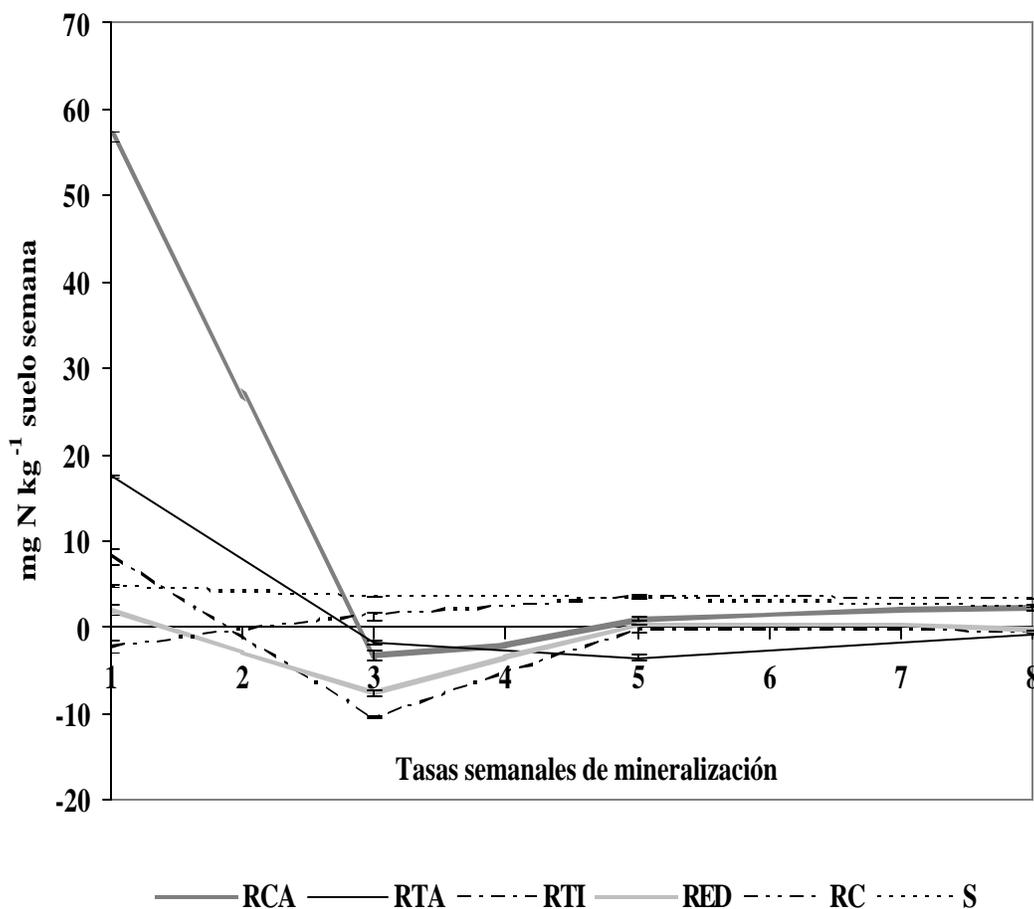


Figura 15. Tasas de mineralización por semana de N presentadas por las raíces finas de especies maderables *T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *Cordia alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED); *C. arabica* (C) y el suelo solo (S). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

4.2. Efectos de la descomposición de material vegetal en el crecimiento inicial de plantas de maíz

Se utilizaron plantas de maíz para evaluar el efecto de la descomposición de material foliar y radicular de los diferentes especies de sombra en el crecimiento inicial de las mismas. La respuesta del maíz fue obtenida por la producción de biomasa y la extracción de N en 30 días después de la germinación bajo condiciones de invernadero. El análisis de varianza realizado para la biomasa y la altura se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.0001$).

En la Figura 16, se analiza los tratamientos de hojas verdes de dos especies leguminosas, y se observa que el tratamiento que presentó un efecto más notorio en la biomasa total del maíz fue HVEP más que el tratamiento HVIE, superando en ambos casos al testigo. En ambos tratamientos el mayor aporte en biomasa proviene del follaje del maíz.

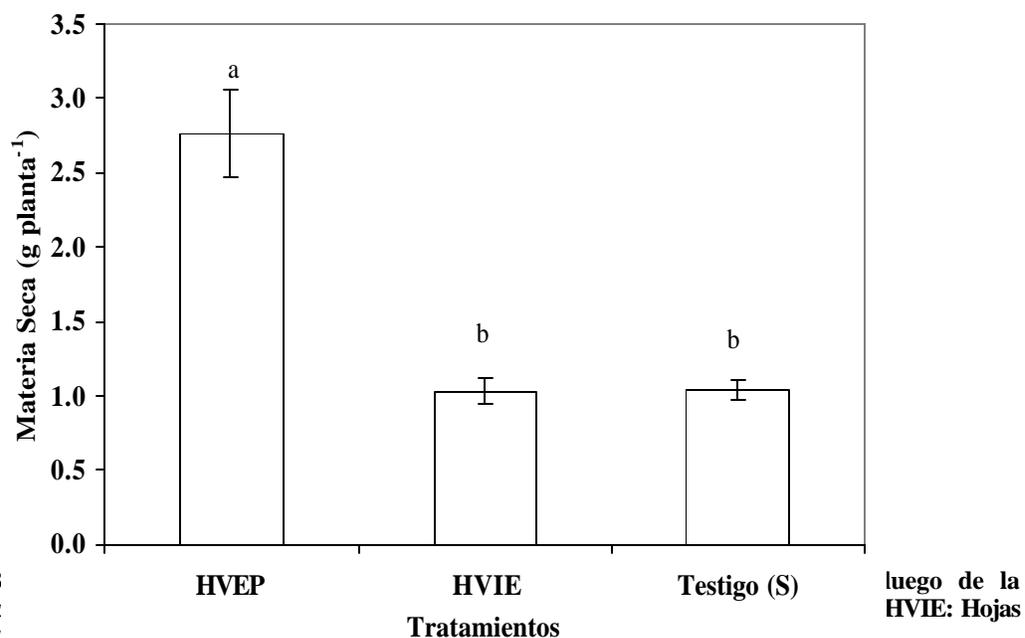


Figura 16. B germinación c verdes de *I. ed*

En la hojarasca, el tratamiento que presentó un aumento mayor en la biomasa total del maíz fue HJEP (Figura 17), mientras que en las raíces el mayor incremento en biomasa fue con RCA. Los demás tratamientos fueron muy similares, sin superar los resultados obtenidos por el testigo (Figura 18).

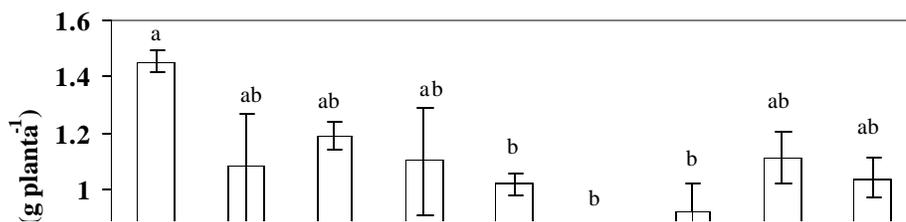


Figura 17. Biomasa (materia seca aérea y raíces) de maíz presentada a los 32 días luego de la germinación con suelo mezclado con los tratamientos: HJEP: Hojarasca de *E. poeppigiana*, HJIE: Hojarasca de *I. edulis*, HJID: Hojarasca de *I. densiflora*, HJED: Hojarasca de *E. deglupta*, HJCA: Hojarasca de *C. alliodora*, Hojarasca de *T. amazonia*, HJTI: Hojarasca de *T. ivorensis*, Hojarasca de *C. arabica*, S: Suelo solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

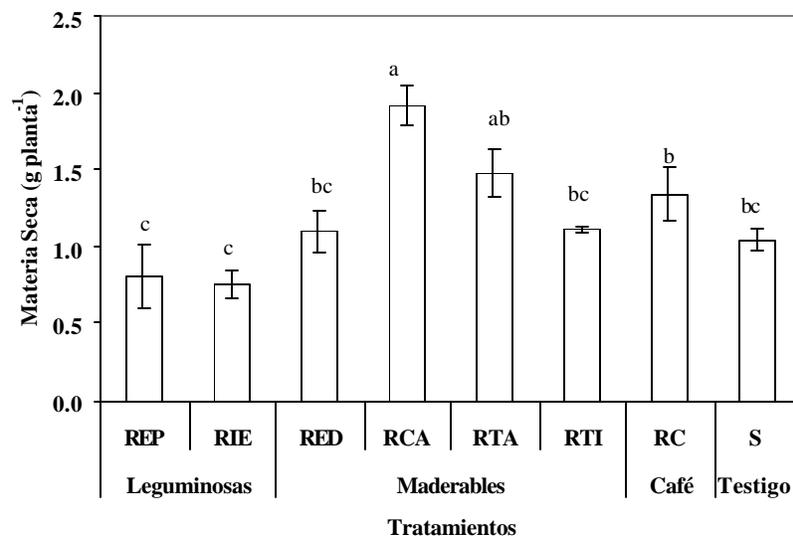


Figura 18. Biomasa (materia seca aérea y raíces) de maíz presentada a los 32 días luego de la germinación con suelo mezclado con los tratamientos: REP: Raíz de *E. poeppigiana*, RIE: Raíz de *I. edulis*, RID: Raíz de *I. densiflora*, RED: Raíz de *E. deglupta*, RCA: Raíz de *C. alliodora*, RTA: Raíz de *T. amazonia*, RTI: Raíz de *T. ivorensis*, RC: Raíz de *C. arabica*, S: Suelo solo. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Con respecto a la concentración de N, los tratamientos que presentaron un mayor incremento en contenido de N fue HVEP y RCA con 3.57 y 1.97% respectivamente, los demás tratamientos tuvieron contenidos de N desde 1.76% en HVIE hasta 1.35% en HJED (Anexo 5). Al restar el contenido de N de las plantas en cada tratamiento, del contenido de N de las plantas en el testigo y dividirlo por el porcentaje de N inicial es posible expresar el N absorbido en forma de porcentaje

inicial aplicado (Tabla 5 y 6). Con base en estos resultados se puede determinar que la absorción de N varió de 4% (HJID) hasta 55% en HVEP en los materiales foliares y de 0.46% a 46% en los radicales.

Tabla 5. Porcentaje de nitrógeno absorbido y almacenado en el tejido de las plantas de maíz en los tratamientos foliares, después de 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	HVEP	HVIE	HJEP	HJIE	HJID	HJED	HJCA	HJTA	HJTI	HJC
N Absorbido (% inicial)	55	13	17	8	4	-2	10	6	11	31
mg N planta ⁻¹	0.98	0.18	0.23	0.19	0.18	0.14	0.13	0.14	0.16	0.19

Tabla 6. Porcentaje de nitrógeno absorbido y almacenado en el tejido de las plantas de maíz en los tratamientos radicales, después de 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	REP	RIE	RED	RCA	RTA	RTI	RC
N Absorbido (% inicial)	0.46	17	-3	46	1	2	16
mg N planta ⁻¹	0.12	0.16	0.15	0.38	0.21	0.16	0.23

Como se mencionó anteriormente los mayores aportes de N inicial fueron presentados por los tratamientos de hojas verdes (HVEP), hojarasca (HJEP) y para raíces (REP) con 3.88, 2.57 y 1.98 g N/100g de material vegetal respectivamente, mientras que los más bajos se presentaron en los tratamientos de hojarasca (HJTA) y raíces (RED) con 1.03 y 0.73 g N/100 g de material vegetal respectivamente. Estas cantidades sumadas al N que aportó cada tratamiento en el proceso de mineralización durante 8 semanas de incubación da como resultado el N total disponible para la planta que para los valores más altos es de 3.92 g N/100 g de HVEP, 2.575 g N/100 g de HJEP, 1.995 g N/100 g de REP, mientras que para los más bajos es de 1.032 g N/100 g HJTA y 0.732 g N/100 g RED.

El mayor contenido de N en el tejido foliar de las plantas de maíz se presentó bajo el tratamiento HVEP con 0.98 mg N planta⁻¹, seguido de RCA, HJEP y RC con 0.38, 0.23 y 0.23 mg N planta⁻¹, respectivamente, mientras que los tratamientos más bajos fueron hojarasca de CA y REP con 0.13 y 0.12 mg N planta⁻¹.

4.3. Descomposición de material foliar y radicular de las especies *Inga densiflora* y *Coffea arabica*

4.3.1. Patrones de descomposición de hojarasca y raíces

Los patrones de pérdida de peso presentados por los tratamientos durante 18 semanas de evaluación, mostraron un comportamiento rápido durante las primeras semanas y lento en las últimas semanas. Con base en el análisis de regresión analizado, el modelo de mejor ajuste para la pérdida de peso seco resultó ser de tipo exponencial de la forma:

$$Y = A e^{-bx}$$

Donde:

Y = Peso seco remanente

A = Peso seco inicial o cantidad inicial de un nutriente (punto de corte sobre el eje Y)

b = Coeficiente de regresión o la constante de descomposición del material vegetal

x = Tiempo en semanas

e = Base de los logaritmos naturales

La aplicación de este modelo, concuerda con los modelos determinados en otros trabajos realizados con diversas especies tropicales sobre descomposición (Babbar y Ewel 1989, Palm y Sánchez 1990, Thomas y Asakawa 1993, Cobo 1998, Muñoz 2002, Munguia 2003).

4.3.2. Pérdidas de peso

Observando los patrones de pérdida de peso presentado por los tratamientos durante el período de evaluación, se puede decir que este proceso fue más intensivo en las primeras semanas de descomposición, para ir disminuyendo con el tiempo. En el ensayo se pudo ver la marcada diferencia entre el comportamiento de la descomposición de la hojarasca con respecto a la de las raíces. En la Figura 19, se puede observar que el tratamiento HJC presentó una rápida descomposición, con una pérdida del 31% de su peso en tan solo 2 semanas y del 60% en la semana 18 de evaluación, mientras que los tratamientos RID y RC perdieron entre 51 y 54% en la semana 18.

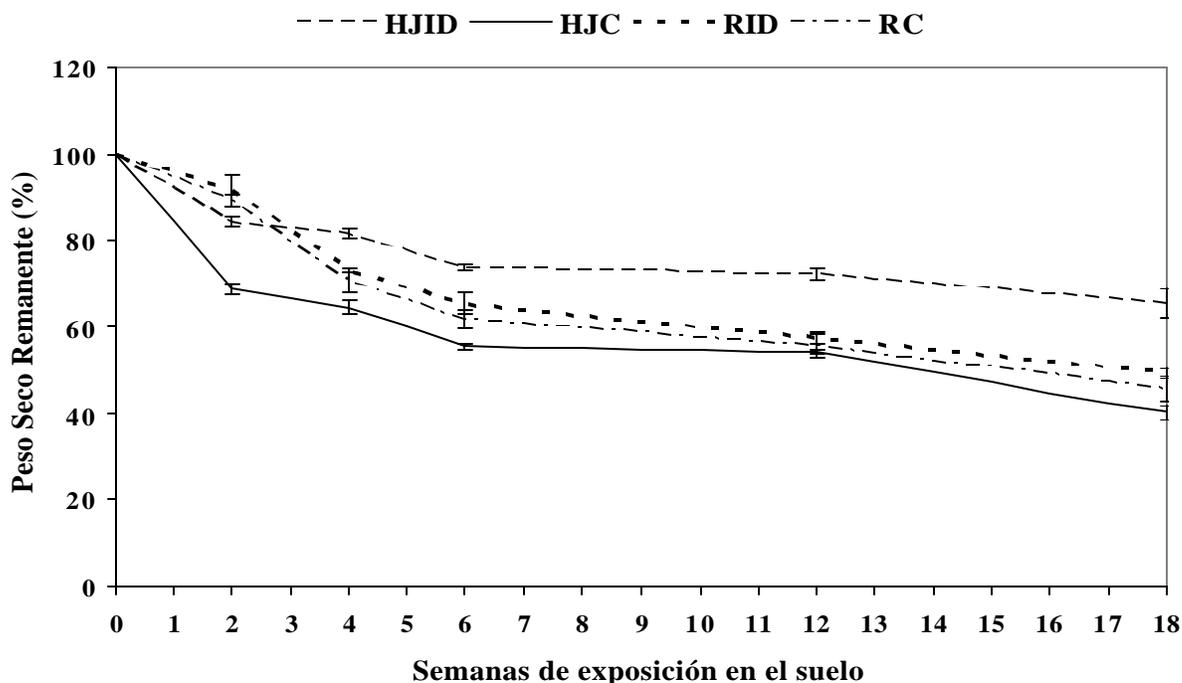


Figura 19. Patrones de peso seco remanente presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *I. densiflora*, HJC: Hojarasca *C. arabica*, RID: Raíz *I. densiflora* y RC: Raíz de *C. arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

En la tabla 7 se presenta el análisis de varianza para el peso seco remanente. Se presentó una diferencia altamente significativa para los diferentes tratamientos. El tratamiento HJID tuvo una lenta descomposición, presentando menor pérdida de peso entre los materiales evaluados (35% en la semana 18). La hojarasca de ID (HJID) obtuvo una tasa de descomposición de - 0.12 inferior a la obtenida por la hojarasca de C (HJC), con una tasa de -0.32, mientras que las tasas de descomposición de los tratamientos RID y RC fueron de -0.27 y -0.29 respectivamente, siendo muy similares.

Tabla 7. Tasas de descomposición ($b^{-\text{día}}$) y estimado del peso remanente o pérdida por descomposición de los cuatro tratamientos evaluados hasta los 126 días. , CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Tasas ($b^{-\text{día}}$)	Coeficiente (r^2)	Peso estimado (%)	
			Remanente	Pérdidas
HJID	- 0.12	0.74	75.4 a	24.6
RID	-0.27	0.94	68.9 b	31.0
RC	-0.29	0.89	64.5 b	35.5
HJC	-0.32	0.81	56.6 c	43.3
Pr>f			0.0001	

Valores con la misma letra no son significativamente diferentes según LSD Tukey, ($p < 0.05$)

Las tasas de descomposición (b), obtenidas para cada tratamiento muestran que las pérdidas de peso presentaron la siguiente tendencia: RC>RID>HJC>HID.

4.3.3. Liberación de N

En el Anexo 6, se presenta las concentraciones iniciales de N presente en el material evaluado, se observa que los tratamientos HJIE y RC presentaron las concentraciones más altas de N, seguido por HJC y en último lugar RID quien presentó el porcentaje más bajo.

La liberación de N esta dada por la diferencia entre el 100% del N y el N remanente (NR) contenido por el material vegetal. La liberación de N en los tratamientos RI y RC, siguió una tendencia muy similar al que presentó el proceso de descomposición, mientras que en los tratamientos de HJID y HJC fue diferente. El nitrógeno liberado (NL) por los tratamientos fue parecido hasta la semana 2 variando entre el 20.8% y el 29.8% para HJID y HJC respectivamente (Figura 20).

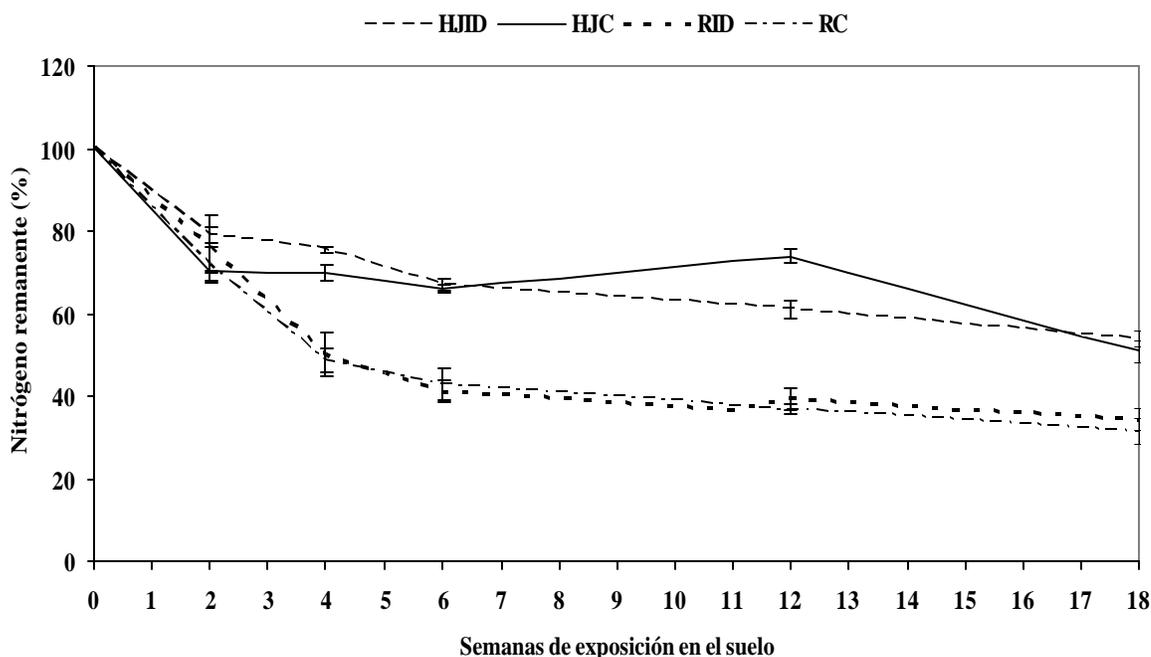


Figura 20. Patrones de pérdida de N presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *I. densiflora* y HJC: Hojarasca *C. arabica*, RID: Raíz *I. densiflora* RC: Raíz *C. arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica. 2004.

El comportamiento de los tratamientos entre la semana 2 y 18 fue diferente presentándose dos grupos (hojarasca y raíces). A partir de la semana 2 los tratamientos de hojarasca presentaron una

liberación de N similar hasta la semana 6. A partir de la semana 12 se presentó una disminución de 26.1 % en la liberación de N en HJC.

En la semana 18 la HJC liberó 49% de N y HJID el 46%. El grupo de las raíces presentaron un comportamiento igual, durante todo el tiempo de evaluación, diferenciándose del grupo de la hojarasca a partir de la semana 2. RID tuvo una liberación de N de 65.7%, mientras RC de 68.5% al cabo de 18 semanas de descomposición. Con respecto a las tasas de liberación de N de los tratamientos evaluados, se pudo observar que las hojarasca de ID y de C, presentaron tasas de liberación bajas, mientras que las de las raíces fueron altas o rápidas (Tabla 8).

Tabla 8. Tasas de liberación ($b^{-\text{día}}$) de N de los cuatro tratamientos evaluados hasta los 126 días. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Tasas ($b^{-\text{día}}$)	Coefficiente (r^2)	N remanente (%)
HJID	- 0.17	0.85	67.4 a
HJC	-0.18	0.68	66.2 a
RID	-0.35	0.72	50.0 b
RC	-0.36	0.79	46.4 b
Pr>F			< 0.0001

Valores con la misma letra no son significativamente diferentes según LSD Tukey, ($p < 0.05$)

4.3.4. Liberación de C

Las concentraciones iniciales de C en los tratamientos evaluados fueron muy similares, siendo mayor en los tratamientos HJID y HJC y menor en los tratamientos RID y RC. La liberación de C esta dada por la diferencia entre el 100% del C y el C remanente (CR) contenido por el material vegetal. Los tratamientos RID y RC siguieron una tendencia muy similar hasta la semana 18 en la cual liberaron 51% y 54.7% de C respectivamente. La mayor liberación de C en la semana 2 fue de HJC con 34.7% (Figura 22). El comportamiento de los tratamientos entre la semana 2 y 18 fue diferente presentándose dos grupos. Uno compuesto por HJID, el cual a partir de la semana 2 presentó una liberación de C similar hasta la semana 18, donde tuvo el menor valor de carbono liberado (CL) (35.8%). El segundo grupo estuvo conformado por los tratamientos HJC, RID y RC, donde RID y RC tuvieron una tendencia similar durante el tiempo de evaluación, presentando 51% y 54.7% de CL en la semana 18, respectivamente, mientras que HJC tuvo el mayor CL con 62.7 %.

Con respecto a las tasas de liberación de C, la Tabla 9 muestra que los tratamientos HJC, RID y RC con -0.22, -0.23 y -0.26 respectivamente, presentaron la tasa de liberación más alta, seguido por una liberación menor de -0.10 de HJID.

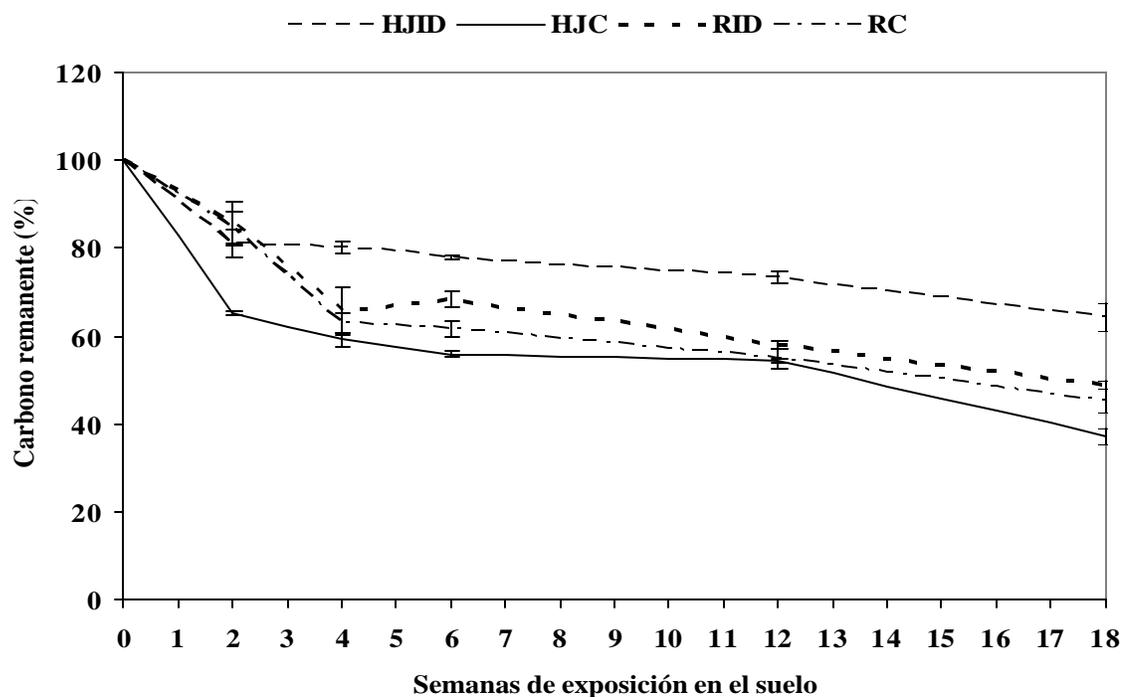


Figura 21. Patrones de pérdida de C presentados por los tratamientos HJID: Hojarasca *I. densiflora* y HJC: Hojarasca *C. arabica*, RID: Raíz *I. densiflora* y RC: Raíz *C. arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Tabla 9. Tasas de liberación ($b^{-\text{día}}$) de C de los cuatro tratamientos evaluados hasta los 126 días. CICAPE, Heredia, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Tasas ($b^{-\text{día}}$)	Coefficiente (r^2)	C remanente (%)
HJID	- 0.10	0.58	75.31 a
RID	-0.23	0.77	66.59 b
RC	-0.26	0.83	61.94 c
HJC	-0.22	0.72	54.38 d
Pr>F			< 0.0001

Valores con la misma letra no son significativamente diferentes según LSD Tukey, ($p < 0.05$)

4.3.5. Relación carbono/nitrógeno (C/N)

Los valores iniciales de la relación C/N fueron diferentes para todos los tratamientos con valores que oscilaron entre 16.3 y 28.1 (Anexo 6). Esta tendencia fue similar hasta la semana 12, mientras que se presentó una disminución en todos los tratamientos en la semana 18 de evaluación (Figura 22).

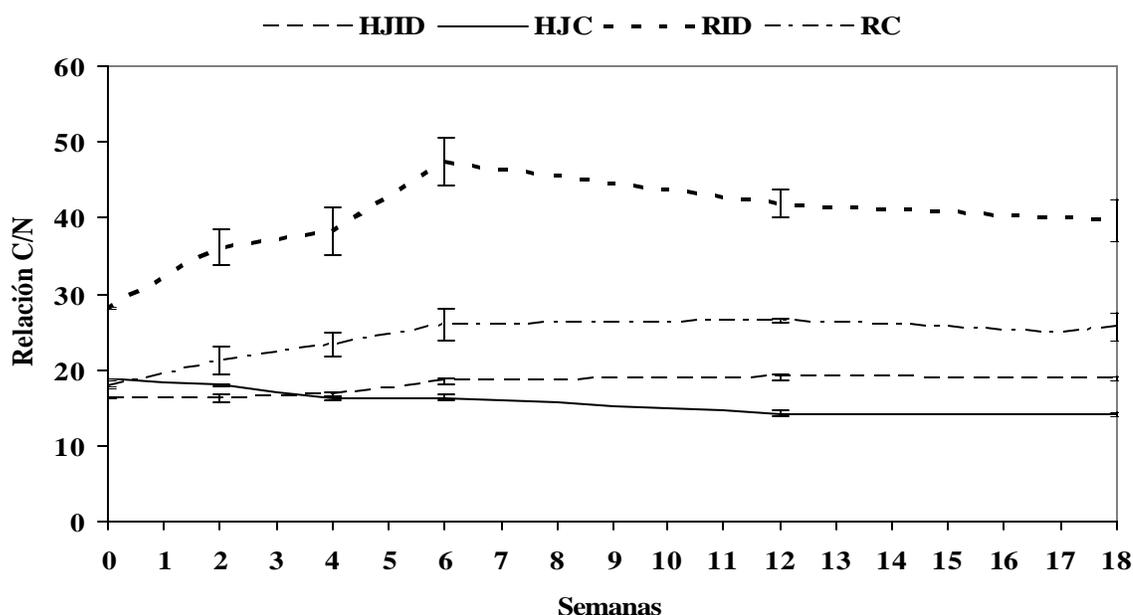


Figura 22. Relación C/N presentada por los tratamientos HJID: Hojarasca *I. densiflora* y HJC: Hojarasca *C. arabica*, RID: Raíz *I. densiflora* y RC: Raíz *C. arabica* a lo largo de 18 semanas de evaluación. CICAFFE, Heredia, Costa Rica 2004.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que la dinámica de la descomposición de los materiales vegetales de las dos especies evaluadas ha confirmado que las tasas de descomposición y liberación de nutrientes están correlacionadas con sus características bioquímicas especialmente el contenido inicial de N, la relación C/N.

4.4. Sincronización entre la demanda del N por el café y la oferta de los residuos vegetales.

La sincronización entre la liberación del nitrógeno por la mineralización y descomposición de residuos vegetales y los momentos en que las plantas de café lo necesiten es tan importante como

los montos totales anuales de su incorporación al suelo (Quintero y Ataroff 1998). En este estudio se esquematiza una sincronización con la aplicación de abonos verdes con la demanda de N por el café.

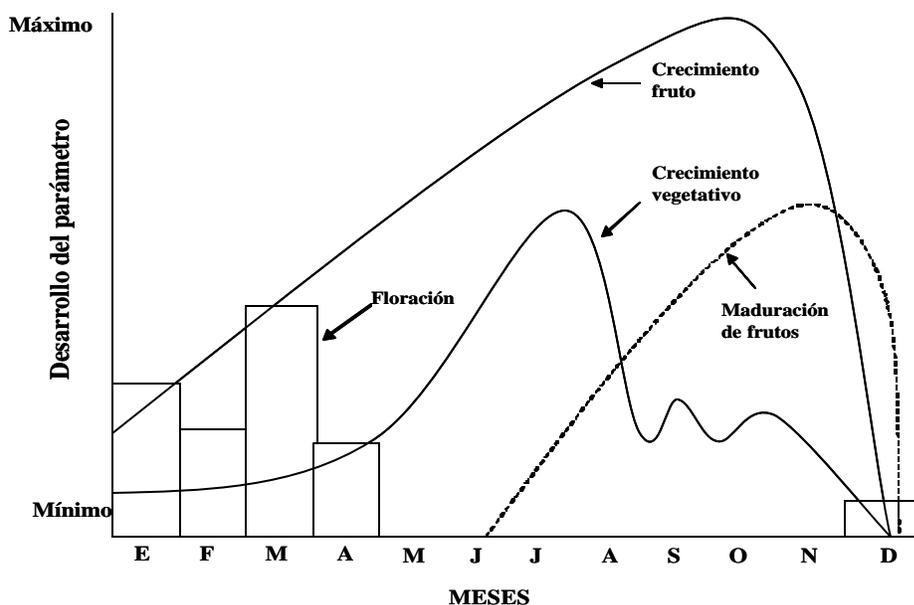


Figura 23. Cambios fenológicos del café a través de un año en la meseta central de Costa Rica. (Fournier, 1980).

Según Fournier (1980), en el valle Central de Costa Rica se presentan los siguientes cambios fenológicos del café (Figura 23):

- ?? Las floraciones principales se concentran en los primeros meses del año.
- ?? El máximo crecimiento vegetativo coincide con la entrada de la época lluviosa a partir del mes de mayo.
- ?? Durante el crecimiento máximo de los frutos (entre agosto y octubre) y el tiempo de maduración del fruto, el crecimiento vegetativo se reduce fuertemente.

Es en las fases de producción donde la planta de café demanda más nitrógeno para poder satisfacer las necesidades en las formaciones de flores (enero a abril) y frutos (julio a diciembre). Por tanto se debe disponer de nitrógeno durante estos periodos mediante un manejo adecuado de fertilizaciones y/o abonamientos con el fin de evitar deficiencias en el cultivo.

V. DISCUSION GENERAL

El estudio sobre la dinámica de la descomposición y mineralización de N en materiales vegetales de especies leguminosas y maderables han confirmado que las tasas de descomposición y mineralización y el ciclaje de nutrientes están correlacionadas con el tipo de componente (hojas verdes, hojarasca y raíces finas) y la calidad (la relación lignina:N) del materia vegetal de las diferentes especies, así como las propiedades bioquímicas (especialmente la concentración inicial de nitrógeno, la relación carbono:nitrógeno) y la temperatura y humedad del suelo (Preston y Trofymow 2000).

Los efectos presentados en la descomposición de los diferentes tratamientos evaluados sobre el nitrógeno mineral del suelo fueron altamente significativos en la mayoría de los casos. Las hojas verdes de las leguminosas *Inga edulis* y *Erythrina poeppigiana* y las raíces de *Cordia alliodora* liberaron las mayores cantidades de nitrógeno mineral en relación con el N mineral del tratamiento testigo (suelo solo). Como en el caso de *I. edulis* que mineralizó 300% más N que el testigo (suelo solo) en un estudio realizado por Meléndez *et al.* (1995), sobre la mineralización de N de material foliar en 18 introducciones de *Inga*, mientras que en este estudio esta especie mineralizó 290% más N que el suelo.

La mineralización presentada por los tratamientos anteriores y su absorción por las plantas de maíz mostraron un efecto positivo y significativo, viéndose reflejado en el incremento de la biomasa y en la concentración del N total. *E. poeppigiana*, fue la especie que tuvo la mayor concentración de N en la biomasa del maíz, superando los contenidos de las otras especies. Esta alta concentración de N confirma el gran potencial que presenta esta especie en el ciclaje de N. Igualmente la concentración de N en la biomasa del maíz, solo alcanzó el nivel adecuado que demanda el cultivo (3.5 a 5% de N, según Bertsch 1995), con la incorporación de los residuos de las hojas verdes.

Con respecto a los tratamientos de hojarasca de las especies leguminosas, la especie *Inga densiflora* fue la que presentó el mejor promedio de la tasa de mineralización, superando las tasas de EP e IE, esto puede estar relacionado con el contenido de lignina presente en los residuos vegetales, lo que reduce su velocidad de descomposición y mineralización. Igualmente, esto puede ser atribuido al hecho que materiales con poco N constituyen un factor limitante para el desarrollo de los microorganismos descomponedores y para la descomposición del residuo mismo (Alexander 1997).

Esto es confirmado por Primavesi (1982), quien manifiesta que los almidones y proteínas son los primeros en ser descompuestos por los microorganismos, seguidos de la celulosa y que la lignina es de descomposición más lenta, dada su compleja estructura.

En la hojarasca de las especies maderables se observó una rápida inmovilización del N desde el inicio de la incubación, como en el caso de las especies *Terminalia ivorensis*, *Cordia alliodora*, y *Eucalyptus deglupta*, aunque al final de la incubación presentaron un decrecimiento en la inmovilización del N. Un comportamiento similar presentaron las raíces a partir de la tercera semana de evaluación.

Estas diferencias en el comportamiento entre las hojas verdes, la hojarasca y las raíces pueden estar dadas principalmente por la diferencia entre la composición química de los residuos y su relación C/N. Los resultados presentados por las hojas verdes de las especies leguminosas, confirman lo señalado por Rivero y Paolini (1995), quienes destacan que con la incorporación de residuos orgánicos los mejores resultados se obtienen con las leguminosas y se debe al logro de una relación C/N (10-15/1) en los tejidos incorporados que modifican de manera apropiada su subsiguiente mineralización. Por otro lado, el contenido de N en los residuos vegetales generalmente es más bajo que en los órganos frescos de la planta; ello es explicable por procesos de reabsorción de nutrimentos antes de la caída de la hojarasca (Fassbender 1993).

La concentración de N o relación C/N ha sido mencionada por varios autores (Handayanto *et al.* 1995, Lehmann *et al.* 1995, Mafongoya *et al.* 1997) como de importancia principal para determinar la tasa de mineralización de residuos de origen vegetal, sin embargo, cuando el residuo de planta contiene una alta concentración de lignina o polifenoles se producen descensos de la tasa de mineralización, derivados de la inhibición de los procesos biológicos implicados.

Concentración de lignina en hojarasca fueron reportadas por Munguia (2003), en las especies *E deglupta*, *E. poeppigiana* y *C. arabica*, con 37 %, 33.6% y 44.8% respectivamente, esto indica que estos materiales tienden a descomponerse más lentamente, como se pudo observar en el presente estudio. Igualmente, este autor, encontró que la concentración de polifenoles en HJED fue de 51.8 mg g⁻¹, factor que tiene una influencia sobre las tasas de liberación y descomposición de nutrientes de este material vegetal ya que se inhiben el crecimiento y la función de los organismos descomponedores (Mafongoya *et al.* 1998, Palm 1995).

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, la tasa de mineralización de N a partir de hojas verdes, hojarasca y raíces de especies leguminosas, maderables y el café es una función de la calidad de los mismos que pueden afectar la eficiencia metabólica de los microorganismos involucrados en este proceso. La concentración de N es un aspecto importante para determinar las tasas de mineralización, dependiendo también de los contenidos de lignina y polifenoles presentes en ellos que pueden producir un aumento o descenso de la tasa de mineralización.

Con respecto al estudio de descomposición se pudo observar que los datos obtenidos para determinar el peso seco remanente de los 4 tratamientos, se ajustaron bien al modelo exponencial, lo que permite predecir cuál sería la descomposición de los residuos a través del tiempo. Esto concuerda con otros estudios realizados sobre descomposición (Babbar y Ewel 1989, Palm y Sánchez 1990, Thomas y Asakawa 1993, Cobo 1998, Muñoz 2002, Munguia 2003).

Las pérdidas de peso presentadas por los tratamientos evaluados fueron rápidas en la fase inicial del ensayo, debido a que este proceso inicial es realizado por la macrofauna que son los encargados de fragmentar físicamente los residuos vegetales con el fin de mejorar las condiciones del material para que la microfauna pueda continuar con el proceso de descomposición. La fase final es llevada a cabo por hongos y bacterias del suelo (Reynolds y Hunter 2001). Igualmente, la descomposición inicial esta también relacionada con la concentración de elementos solubles en agua y carbohidratos, mientras que la fase final de la descomposición esta más relacionada con los contenidos de ligninas presentes en los materiales (Preston y Trofymow 2000). Por otro lado, la calidad y cantidad de recursos del suelo y la hojarasca afectan directamente la abundancia, composición y actividad de la comunidad descomponedora.

Para el caso de la hojarasca de *Inga densiflora*, la tasa de descomposición fue lenta, lo cual concuerda con estudios realizados por Palm (1990), tanto en trabajos de campo como en laboratorio. Este autor menciona que los residuos de hojas de leguminosas con alto contenido de polifenoles solubles (como en el caso de algunas especies de *Inga spp.*) descomponen y mineralizan N menos rápidamente que los materiales con bajo contenido de polifenoles solubles (como en hojas de *Erythrina sp.*), mientras que el comportamiento de la tasa de descomposición fue mayor en la hojarasca del café. Otras especies de *Inga spp* presentan un alto contenido de lignina y polifenoles como en el caso de *I. edulis* que presenta 16.6% y 3.43% respectivamente (Palm y Sánchez 1990). Datos similares fueron reportados por Aranguren *et al.*, (1982) donde indica que los residuos foliares de sombra de *Inga spp* de un cafetal se descomponen en un 50% en dos meses.

La descomposición en la hojarasca de *I. densiflora* al cabo de 18 semanas fue del 46% y del café fue de 49% para el mismo periodo. La rápida descomposición presentada por la hojarasca del café se debió a su baja relación C/N y a la mayor liberación de N, con respecto a la hojarasca de *I. densiflora*, quien presentó una descomposición más lenta, viéndose reflejado en la lenta pérdida de peso seco. Datos similares fueron reportados por Munguia (2003) en la hojarasca de *C. arabica*, encontrando una tasa ($b \text{ día}^{-1}$) de -0.20 en 93 días de descomposición, llegando a descomponer un 40%, además reporta un contenido de lignina en la hojarasca de 44%. Estas pérdidas de peso también fueron reportadas por Suárez y Carrillo (1976) durante un período de 90 días, donde obtuvieron un 43% de material descompuesto.

Las tasas de descomposición de las raíces de *I. densiflora* y *C. arabica* fueron muy similares. El patrón de liberación de N fue similar al patrón de la descomposición. Estos resultados pueden ser explicados por las características propias de estos materiales (edad, calidad, composición bioquímica etc.) e incluso por las condiciones ambientales durante el ensayo. Melillo *et al.* 1989 menciona que los factores que pueden influir en el proceso de la descomposición son la concentración inicial de N, los compuestos solubles, lignina, las relaciones C/N, lignina/celulosa y lignina/nitrógeno.

Evaluando las tasas de liberación de *C. arabica* se puede mencionar que los contenidos iniciales de las especies evaluadas fueron similares, sin embargo presentaron tasas de liberación muy diferentes y relacionadas directamente con la tasa de descomposición propia de cada especie. Las tasas más altas de liberación de *C. arabica* fueron mayores en las raíces que en las hojarascas, concordando esto con sus altas tasas de descomposición.

Datos similares fueron reportados por Arguello (1988), en un estudio realizado en Colombia con las especies *Albizia carbonaria*, *Cajanus cajan*, *Cassia grandis*, *Gliricidia sepium*, *Ilex nayana*, *Phyllanthus acuminatus* y *Sesbania grandiflora* quien encontró que a la semana 9 y 18 de descomposición, las especies con pérdidas de C más altas tenían la más alta tasa de descomposición. Esta diferencia en la liberación de C en los tratamientos evaluados puede deberse a la proporción de lignina, por lo que residuos vegetales con elevados contenidos de lignina que son más resistentes a la descomposición que los materiales pobres en este compuesto (Swift *et al.*, 1979). Al respecto, Minderman (1968), menciona que esto probablemente sucede porque existen pocos microorganismos capaces de degradar la lignina y son, además, exclusivamente aeróbicos. Sin embargo, la lignina se degrada ininterrumpidamente, aunque con lentitud, en condiciones

aerobias en el suelo. Como ejemplo de lo anterior, Palm y Sánchez (1990) determinaron que *Erythrina* spp libera nutrientes significativamente más rápido debido a la presencia de bajos contenidos de polifenoles en las hojas al compararse con *Inga*.

En síntesis, el adecuado manejo de los residuos vegetales que se pueden incorporar al suelo puede ser un recurso para el incremento de su productividad, por tal razón es necesario conservar los nutrientes existentes o realizar la aplicación con insumos de bajo costo, reduciendo además el posible impacto ambiental causado por los fertilizantes químicos nitrogenados. El manejo de los cultivos con abonos verdes puede ayudar a disminuir las pérdidas del N por lixiviación y mantener el mayor tiempo el N disponible en el suelo para que sea absorbido por las plantas.

El café tiene periodos críticos bien definidos de demanda de nutrientes; por lo cual si los nutrientes se pueden poner a disposición del café durante este período, se logrará la eficiencia del uso de especies asociadas en los sistemas cafetaleros, lo que permitirá al productor bajar los costos de fertilización y control de malezas así como incrementar la productividad y sustentabilidad del sistema. La mayor demanda de N por el café se presenta durante la floración y la maduración de los frutos, etapas que son indicadoras del momento adecuado para que exista una alta disponibilidad de N en el suelo. La utilización de abonos como las hojas verdes de las especies leguminosas *Erythrina poeppigiana* e *Inga edulis* o las hojarasca de las especies leguminosas o maderables contempladas en este estudio pueden contribuir en la sincronización entre el N adicionado al suelo y la demanda del café mediante un manejo adecuado.

Esta sincronía podría alcanzarse mediante el conocimiento previo de los patrones de mineralización y liberación de N de los materiales que se van a utilizar y la época de requerimiento por parte del café. Es así como realizando podas de *Erythrina poeppigiana* con cuatro semanas aproximadamente de anterioridad a la demanda de N por la planta de café se puede suplir en gran parte o casi totalmente la necesidad de este elemento, ya que es al acabo de este tiempo es cuando ocurre la mayor parte de la mineralización del N por parte de la hojarasca adicionada al suelo proveniente de las podas. Igualmente, si se adiciona hojarasca de la especie *Inga edulis* la cual tarda más en mineralizar N (8 semanas) se tendría que realizar una poda aproximadamente dos meses antes de la demanda de N por parte del café. Es importante aclarar que la descomposición y liberación de N dependerán de la calidad del suelo y la presencia de microorganismos en éste.

Sin embargo, muchas de las especies usadas como abono verde, no tendrán el suficiente impacto en aumentar y/o mantener por si solas la fertilidad de los suelos, en relación con la disponibilidad de N

y la demanda del cultivo, teniéndose que suplir el déficit con entradas externas del sistema, lo que puede generar costos adicionales al productor.

Meléndez, (2003) afirma que debe haber una sincronía entre los nutrientes existentes en el suelo y la demanda por ellos por parte del cultivo. Esta sincronía ocurre cuando la liberación del nutriente es similar a lo requerido por la planta tanto en espacio como en el tiempo. Este autor comenta además que con un manejo adecuado de N se puede aumentar (mineralización) o inhibir (inmovilización) la cantidad de nutriente disponible a la planta, promoviendo la sincronía entre la demanda y la disponibilidad de los nutrientes, manipulando la demanda por las plantas (tipo de cultivo, fecha de siembra, cultivos múltiples) y/o controlando la cantidad y calidad y tiempo de adicionar los insumos orgánicos. Esta calendarización o sincronía podría lograrse realizando mezclas de materiales vegetales que presenten altas tasas de liberación de N a corto plazo como por ejemplo la *E. poeppigiana* con otros materiales de tasas más bajas a largo plazo como *E. deglupta*, esto con el objetivo de poder manejar la cantidad de N que puede ser aportada por estos residuos.

Los estudios de descomposición, mineralización y liberación de nutrientes son una herramienta importante para la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestales. Esta información generada tiene implicaciones de manejo importantes lo cual permitirá decidir la aplicación de abonos verdes provenientes de la poda de árboles leguminosos y/o malezas asociados con el cultivo del café (sincronía).

VI. CONCLUSIONES

- 1.- En el presente trabajo se presentaron diferencias entre las especies leguminosas, las maderables y el café en los procesos de descomposición, mineralización y liberación de N, como también en la absorción por plantas de maíz, verificando así las hipótesis de este trabajo.
- 2.- La descomposición, mineralización y liberación del N a partir de los materiales vegetales evaluados, así como la absorción de N por las plantas, fueron influenciados principalmente por los contenidos iniciales de N y dependientes de la calidad del residuo.
- 3.- Las hojas verdes de *Erythrina poeppigiana* e *Inga edulis*, presentaron las mayores tasas de mineralización y liberación de nutrientes que el resto de tratamientos; mientras que la hojarasca de *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia* presentaron las tasas de mineralización más bajas.
- 4.- Los patrones de mineralización de las raíces finas fueron más altas que las presentadas por la hojarasca de las especies evaluadas, debido a la calidad (contenido de lignina, relación carbón a nitrógeno (C:N), polifenol a nitrógeno (PP:N), lignina a nitrógeno (L:N), y polifenoles + lignina a nitrógeno (PP+L):N) y composición bioquímica de las raíces. La mayor mineralización presentada bajo condiciones de laboratorio fueron las raíces de *Cordia alliodora* superando a las raíces de las especies leguminosas, otras maderables y el café, mientras que en condiciones de campo, la descomposición de las raíces finas de las especies *Inga densiflora* y *Coffea arabica* superaron la descomposición de la hojarasca de estas especies. Por lo tanto estas especies puede contribuir en los sistemas agroforestales con café a la conservación y protección de los suelos mediante su aporte en hojarasca de lenta descomposición y a la vez puede contribuir al reciclaje de nutrientes mediante la descomposición rápida de sus raíces finas.
- 5.- Las mezclas de suelo más hojas verdes de *E. poeppigiana* contribuyeron a la producción de una mayor biomasa y crecimiento en las plantas de maíz, siendo el tratamiento que suplió los requerimientos nutricionales del maíz, por lo que no se depende de fertilizaciones adicionales con productos nitrogenados, lo que puede contrarrestar el daño causado en el ecosistema por el uso de productos químicos, como herbicidas, fungicidas e insecticidas que son usados en este cultivo.

VII. RECOMENDACIONES

1.- La asociación de *E. poeppigiana* con café es una de las mejores alternativas en cuanto al ciclaje de nutrientes dentro del sistema, ya que la incorporación de las hojas verdes como abono verde, mediante podas contribuyen a un mayor aporte de materia orgánica al suelo, así como a una mayor mineralización y liberación de N.

2.- El manejo de las especies leguminosas usadas como sombrío en asocio con diferentes cultivos debe realizarse en sincronía con la demanda del cultivo, para lo cual los productores deben realizar el aporte de abono verde de las especies asociadas de acuerdo a la demanda de nutrientes del cultivo y acorde a sus necesidades en sus diferentes fases fenológicas, por lo tanto las podas se deben hacer entre uno y dos meses aproximadamente a la demanda de N indistintamente a que las hojas de las especies maderables estén cayendo ya que la mineralización del N es diferente para cada una de las especies.

3.- Es muy recomendable asociar con el cultivo del café especies maderables combinadas con leguminosas con el fin de tener sistemas agroforestales diversificados en los cuales se pueda suplir las necesidades del N por parte del café con material vegetal (hojarasca) proveniente de la caída natural de hojas de las especies maderables y de podas para el caso de las leguminosas, esto con el fin de tener disponibilidad de N en el corto, mediano y largo plazo pues las leguminosas como *E. poeppigiana* e *I. edulis* mineralizan N en el corto plazo mientras que especies maderables como *T. ivorensis*, *C. alliodora*, *T. amazonia*, *E. deglupta* mineralizan en el mediano y largo plazo.

3.- Las especies maderables presentaron una lenta descomposición y mineralización en la hojarasca, lo que desfavorece al sistema si se espera un reciclaje rápido de nutrientes. Sin embargo, esto resulta ser favorable desde el punto de vista de protección de los suelos, ya que una cobertura de lenta descomposición protege el suelo de la radiación solar, conserva la humedad, minimiza la temperatura y evita la pérdida de materia orgánica por erosión.

4.- La contribución de las raíces finas a la materia orgánica y a la fertilidad del suelo no ha sido muy estudiada. Los resultados mostrados en este estudio con respecto a la descomposición y mineralización de las raíces de *Cordia alliodora*, pueden sugerir una fuerte potencial de mejoramiento de la materia orgánica del suelo en los sistemas agroforestales por la biomasa de sus raíces. Sin embargo, es necesario profundizar más sobre este tema.

5.- Se requiere estudios complementarios que evalúen la descomposición de materiales vegetales en mezclas, especialmente con especies que posean hojarasca de alta calidad con otras de baja calidad esto con el fin de permitir desarrollar estrategias de manejo de los sistemas agroforestales en busca de un mejoramiento de la sostenibilidad del sistema.

6.- Es importante desarrollar estudios adicionales en las especies *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia* sobre el contenido de materia orgánica del suelo y poder cuantificar sus efectos a largo plazo sobre la fertilidad del mismo.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alegre, J; Rao, M. 1996. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Perú. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 57: 17-25.
- Alexander, M. 1977. *Introduction to soil microbiology*. 2 ed. New York, J. Willey. 474p.
- Anderson, M.J; Ingram, J.M. 1993. *Tropical soil biology and fertility. A Handbook of Methods*. 2 ed. C.A.B: International. 215p.
- Anderson, J.M; Swift, M.J. 1983. Decomposition in tropical forest. *In: Sutton SL, Whitmore TC and Chadwick AC (eds.). Tropical Rain Forest: Ecology and Management*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, UK. P 287-309.
- Aranguren, J; Escalante, G; Herrera, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. I. Coffee. *Plant and Soil*. 67: 247-258.
- Arguello, H. 1988. Tasa de descomposición y liberación de nutrientes en el follaje de ocho especies de interés agroforestal en la franja premontano de Colombia. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR/CATIE. 132p.
- Babbar, L.I; Ewel, J. 1989. Descomposición del follaje en diversos ecosistemas sucesionales tropicales. *Biotrópica*. 21:29-29.
- Babbar, LI; Zak, D.R. 1995. Nitrogen cycling in coffee agroecosystems: net N mineralization and nitrification in the presence and absence of shade tree. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 48:107-113.
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 38:139-164
- Bertsch, H.F. 1995. *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo*. San José, Costa Rica. 157p.
- Bremner, J.M. 1965. Nitrogen availability indexes. *In Methods for Soil Analysis. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy. P 1324-1345.
- Budelman, A. 1989. Nutrient composition of the leaf biomass of three selected woody leguminous species. *Agroforestry Systems*. 8: 39-51.
- CIAT. 1998. Annual report. Project PE2: Overcoming Soil Degradation. 123 p.
- CENICAFE. 1993. La materia orgánica y su importancia en el cultivo del café. *Boletín Técnico* No. 16. Chinchina, Caldas, Colombia. 24p.
- Cobo, J.G. 1998. Abonos verdes como fuente de nitrógeno en un agroecosistema tropical de ladera en Colombia. Tesis M Sc., Turrialba, CATIE, Costa Rica. 86p.

- Constantinides, M; Fownes, J. 1994. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Bio. Biochem.* 26:49-55.
- Cubero, D. 1994. *Manual de Conservación de Suelos y Aguas*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. 2 ed. San José, Costa Rica. 300p.
- Cuenca, G; Aranguren, J; Herrera, R. 1983. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade tree. *Plant and Soil.* 71:477-486.
- Da Costa M, 1995. Abonos verdes: una práctica indispensable en los sistemas agrícolas de las regiones tropicales y subtropicales *In: García JE y Monte-Najera J (eds.). Agricultura Orgánica. Simposio Centroamericano (1995, San José, Costa Rica). Memorias. San José, Costa Rica. P 91-119.*
- De la Salas, G. 1987. *Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América Tropical*. IICA. San José, Costa Rica. 450p.
- De Melo, E.V; Haggard, J; Staver, C. 2002. Sostenibilidad y Sinergismo en Sistemas Agroforestales con Café. *In Simposio Internacional de Café y Cacao. Habana, Cuba. 4p.*
- Díaz-Romeu, R.1970. Contenido de la materia orgánica y nitrógeno de los suelos de América Central. *Turrialba, Costa Rica.* 20:185-192.
- Doefer, T; Budelman, A; Toulmin, C; Carter, S.E. 2000. Building common knowledge. Participatory learning and action research (Part 1).*In Doefer, T; Budelman, A. (eds.). Managing Soil Fertility in the Tropics. A Resource Guide for Participatory Learning and Action Research. Tesis M.Sc. Amsterdam, The Netherlands: Royal Tropical Institute. 208p.*
- Domínguez, M; González, E; Penalva, A. 1995. Manejo de la caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) en el cultivo de maíz y el período de barbecho con leguminosas de coberturas. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)* 31:20-35.
- Fassbender, H.W. 1993. *Modelos Edafológicos de Sistemas Agroforestales. Serie de Materiales de Enseñanza N° 29. Segunda edición. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 530p.*
- Fassbender, H.W; Bornemiza, E. 1987. *Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica. 420p.*
- Fournier, L.A. 1980. Fundamentos ecomorfofisiológicos de importancia en la nutrición mineral del cafeto. *In PROMECAFE. Curso Regional sobre Nutrición Mineral del Café. San José, Costa Rica: IICA. 23p.*
- Galloway, G; Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central, CATIE, Costa Rica: Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 165p.
- Giller, K; Wilson, K. 1991. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems. CAB International. UK. 313p.*

- Glover, N; Beer, J.W. 1983. Spatial and temporal fluctuation of litter fall in the agroforestry associations *Coffea arabica* – *Erythrina poeppigiana* and *C. arabica*- *E. poeppigiana*-*Cordia alliodora*. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 43p.
- Gupta, R.K. 1986. Role of *Eucalyptus* in soil and water conservation with reference to social agroforestry. *Eucalyptus* in India. Past, present and future. P 139-148.
- Gutiérrez, M. 2003. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis M.Sc., Turrialba, CATIE, Costa Rica. 62p.
- Handayanto, E; Cadisch,G.; Giller, K.E. 1995. Manipulation of quality and mineralization of tropical legume tree prunings by varying nitrogen supply. *Plant and Soil*. 176:149-160
- Handayanto, E; Cadisch, G; Giller, K.E. 1997. Regulating N release from legume tree prunings by mixing residues of different quality. *Soil Biol. Biochem.* 29:1417-1426.
- Heal, O.W; Anderson, J.M; Swift, M.J. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview *In: Cadish G and Giller KE (eds.). Driven by nature: Plant Litter Quality and Decomposition.* CAB International, Wallingford, UK. P 3-30.
- Hawkins, R; Sembiring, H; Lubis Suwardjo, D. 1990. The Potencial of Alley Cropping in the uplands of East and Central Java. Agency for Agricultural Research and Development. Departament of Agriculture, Indonesia. 71 p.
- Jimenez, F; Muschler, R; Kopsell, E. 2001. Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. CATIE, Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica. 187p.
- Kass, D. 1996. Fertilidad de suelos. EUNED. San José, Costa Rica. 233p.
- Kershner, R; Montagnini, F. 1998. Leaf litter decomposition, litterfall, and effects of leaf mulches from mixed and monospecific plantations in Costa Rica. *Journal of Sustainable Forestry*. 7(3-4):95-118.
- Kogel-Knabner, I. 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as input to soil organic mater. *Soil Biology & Biochemistry*. 34:139-162.
- Leakey, R. 1997. Reconsiderando la definición de Agroforestería. *Agroforestería en las Américas*. 4 (16): 22-24.
- Lehmann, J; Schroth, G; Zech, W. 1995. Decomposition and nutrient release from leaves, twigs and roots of three alley-cropped tree legumes in Central Togo. *Agroforestry Systems*. 29:21-36.
- Lavelle, P. 1994. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystems function. *In: XV ISSS Congress Proceedings, Vol. 1: Introductory Conferences.* Acapulco, Mexico. P 189-220.
- Lousier, J.D; Parkinson, D. 1975. Litter decomposition in a cool temperate deciduous forest. *Cannadian Journal of Botany*. 54:419-435.

- Mafongoya, P.L; Giller, K.E; Palm, C.A. 1998. Decomposition and nitrogen release patterns tree prunings and litter. *Agroforestry Systems*. 38:77-97
- Mata, R.A; Ramírez J.E. 1999. Estudio de caracterización de suelos y su relación con el manejo del cultivo de café en la provincia de Heredia. Heredia, CICAPE, Costa Rica. 29p.
- Meentemeyer, V. 1978. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*. 59:465-472.
- Meléndez, G. 2003. Residuos orgánicos y la materia orgánica del suelo. Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica. *In* Taller de abonos orgánicos. Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), UCR. Sabanilla, Costa Rica. 18p.
- Meléndez, G; Szott, T; Ricse, A. 1995. Mineralización de nitrógeno de material foliar de especies de *Inga*. Nitrogen Fixing Tree, research report (EUA). P 35-41.
- Melillo, J.M; Aber, J.D; Linkins A.E. 1989. Carbon and nitrogen dynamics along a decay continuum: plant litter to soil organic matter. *In*: Clarholm M and Bergstrom L (eds.) *Ecology of Arable Land*. P 223-230.
- Minderman, G. 1968. Addition, decomposition and accumulation of organic mater in forest. *Journal of Ecology*. 56:355-362.
- Montagnini, F. 1992. Sistemas agroforestales: Principios y aplicaciones en los trópicos. 2 ed. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica. 622p.
- Montagnini, F; Jordan, C.F; Matta, R. 1999. Reciclaje y eficiencia en el uso de nutrients en sistemas agroforestales. *In* F. Montagnini (ed.) *Management and Conservation of Forest and Biodiversity*. November, 1999. Collection of articles. The International Foundation of Science-CATIE., Turrialba ,Costa Rica. 34p.
- Mungia, R. 2003. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de hojarasca de *E. deglupta*, *C.arabica* y de hojas verdes de *E. Poeppigiana* encontró que las hojas verdes de *E. Poeppigiana* solas y en mezclas. Tesis MSc. Turrialba, CATIE, Costa Rica 82p.
- Muñoz, C. Y. 2002. Disponibilidad de nutrimentos en tres compost. Tesis M.Sc. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 67p.
- Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica. 139p.
- Myers, R.J.K; Cuevas, E; Brossard, M. 1994. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. *In* *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Woormer, PL; MJ (eds.). CAB International, Wallingford, UK P 81-116.
- Nair, R. 1997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Mexico.543p.
- Palm, C.A; Sánchez, P.A. 1990. Decomposition and nutrient release of the leaves of three tropical legumes. *Biotropica*. 22:330-338.

- Palm, C.A; Sánchez, P.A. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biol. Biochem.* 23 (1):83-88.
- Palm, C.A. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems.* 30:105-124
- Preston C.M; Trofymow J.A. 2000. Canadian Intersite Decomposition Experiment Working Group, Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests. *Canadian Journal of Botany.* 78:1269-1287.
- Primavesi, A. 1982. Manejo agroecológico del suelo. 5 ed. Argentina. Ediciones El Ateneo. 495p.
- Quintero, J.S; Ataroff, M. 1998. Contenido y flujos de nitrógeno en la biomasa y hojarasca de un cafetal a plena exposición solar en los Andes Venezolanos. *Revista Facultad de Agronomía (LUZ).* 15:501-514.
- Reynolds B.C; Hunter, M.D. 2001. Responses of soil respiration, soil nutrients, and litter decomposition to inputs from canopy herbivores. *Soil Biol. Biochem.*33:1641-1652.
- Reynolds-Vargas, J.S; Richter, D. D; Bornemisza, E. 1994. Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized andisols in the valley of Costa Rica. *Soil Sci.* 157:289-299.
- Rivero, C; Paolini, J. 1995. Efecto de la incorporación de residuos sobre la evolución de CO₂ de dos suelos Venezolanos, *Rev.Fac. Agron. (Maracay).* 21:37-49.
- Russo, R; Budowski, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomass of *Erythrina poeppigiana* as coffee shade tree. *Agroforestry Systems (Holanda).* 4(2):145-162.
- Salisbury, F.B; Ross,C. 1994. Fisiología Vegetal. 4 ed. Grupo Editorial Iberoamérica. México. 759p.
- Sánchez, P. 1981. Suelos del Trópico: Características y Manejo. IITA, San José, Costa Rica. 634 p.
- Sánchez, P.A; Palm, C.A; Davey, C.B; Szott, L.T; Russell, C.E. 1985. Tree crops as soil improvers in the humid tropics? *In* Cannell, M.G; Jackson, J.E (eds.) *Attributes of Trees as Crop Plants.* Institute of Terrestrial Ecology. Natural Environmental Research Council. Huntingdon, England. P 327-350.
- Singh, J.S; Gupta, S.R. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review.* 43:449-528.
- Silva, A.; Ponce De León, J; Carassa, R; Reyes, W. 1992. Efecto de la aplicación de efluentes orgánicos de tambo sobre la producción de verdeos y propiedades físico-químicas del suelo. *Notas. Técnicas N° 16.* Facultad de Agronomía. Uruguay. 16 p.
- Soil Science Society of America. 1987. Glossary of soil science terms. SSSA, Madison, WI.

- Smith, J.L. 1994. Cycling of nitrogen through microbial activity. *In*: Hatfield J.L.; Stewart BA (eds.) Soil Biology: Effects on Soil Quality. Advances in Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. P 91-120.
- Somarriba, E. 1992. Timber harvest damage to crop plants and yield reduction in two Costa Rican coffee plantations with *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Boletín Técnico No. 16. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Solórzano, P.P. 1997. Fertilidad del suelo, su manejo en la producción agrícola. Alcance (51) Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay-Venezuela. 201p.
- Suaréz, J; Carrillo, A. 1976. Descomposición biológica de leguminosas y otros materiales de la zona cafetera Colombiana: CENICAFE. 27:67-77.
- Swift, M.J. 1985. Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF); Planning for research Biology International, special issue 9. 24p.
- Swift, M.J; Heal, W.O; Anderson, J.M. 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Studies in Ecology, Vol 5. University of California Press, Berkeley, California, USA. 372p.
- Szott, L; Fernandez, E.C; Sánchez, P.A. 1991. Soil plant interactions in agroforestry systems. Forest Ecology and Management. 45:127-152.
- Szott, L.T, Kass, C.L. 1993. Fertilizers in agroforestry systems. Agroforestry Systems. 23: 157-176.
- Tañer, E.V; Cuevas, E. 1998. Experimental investigation of nutrient limitation of forest growth on wet tropical mountains. Ecology. 79 (1): 10-22.
- Tavares, C.F.; Beer, J; Jimenez, F; Schroth, G; Fonseca, C. 1999. Experiencia de agricultores de Costa Rica con la introducción de árboles maderables en plantaciones de café. Agroforestería en las Américas. 6(23):17-20.
- Tian, G; Brussaard, L; Kang, B.T; Swift, M.L. 1997. Soil fauna-mediated decomposition of plant residues under constrained environmental and residue quality conditions. *In* G. Cadish; K. E. Giller. (eds.) Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition. CAB International. P 125-134.
- Thomas, R; Asakawa, N. 1993. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. Soil Biol. Biochem. 25:1351-1361.
- Vallis, I; Jones, R.J. 1973. Net mineralization of nitrogen in leaves and leaf litter of *Desmodium intortum* and *Phaseolus atropurpureus* mixed with soil. Soil Biology and Biochemistry. 5:391-398.
- Vaast, P; Snoeck, D. 1999. Hacia un manejo sostenible de la material orgánica y de la fertilidad biológica de los suelos cafetaleros. *In* Beltrand, B y Rapidez, B. (eds.) Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José, Costa Rica: IICA. PROMECAFE: CIRAD: IRD: CCCR. Francia. P 139-170.

- Vaast, P; Snoeck, D. 1999. Hacia un manejo sostenible de la material orgánica y de la fertilidad biológica de los suelos cafetaleros. *In* Beltrand, B y Rapidez, B. (eds.). Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José, Costa Rica:IICA. PROMECAFE: CIRAD: IRD: CCCR. Francia. p 148. Fuente original: Wrigley, G. 1988. Coffee. New York, Longman.
- Voroney, R.P; Paul, E.A; Anderson, D.W. 1989. Decomposition of wheat straw and stabilization of microbial products. *Canadian Journal of Soil Science.* 69:63-77.
- Waring, S; Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as a index of nitrogen availability. *Nature (G.B.).* 201:951-952.
- Weider, R.K; Lang, G.E. 1982. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology.* 63(6):1636-1642.
- Wild, A. 1972. Mineralization of soil nitrogen at a savanna site in Nigeria. *Experimental Agronomy.* 8:91-97.
- Yadvinder, S; Ladha J.K; Vigía; S; Khind, C. 1994. Management of nutrients yields in green manure systems. *In* Ladha JK y Garrity DP (eds.). Green Manure Production Systems for Asian Ricelands. IRRI.Philippines. P 125-153
- Young, A. 1989. Agroforestry for Soil Conservation. CAB International. International Council for Research in Agroforestry. United Kingdom. 276 p.

ANEXOS

Anexo 1. Mineralización acumulada (mg N kg⁻¹ de suelo) durante ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamientos	Tasa promedia
HVEP (<i>Erythrina poeppigiana</i>)	395.6 a
HVIE (<i>Inga edulis</i>)	384.2 a
RCA (<i>Cordia alliodora</i>)	275.7 b
HJID (<i>Inga densiflora</i>)	155.9 c
REP (<i>E. poeppigiana</i>)	147.26 c
S (<i>Suelo</i>)	132 d
HJIE (<i>I. edulis</i>)	123.2 de
RIE (<i>I. edulis</i>)	116.70 e
RTA (<i>Terminalia amazonia</i>)	99.3 f
RID (<i>Inga densiflora</i>)	95.5 f
RC (<i>Coffea arabica</i>)	80.5 g
HJEP (<i>E. poeppigiana</i>)	48.8 h
HJC (<i>C. arabica</i>)	33.3 i
HJCA (<i>C. alliodora</i>)	28.4 ij
RTI (<i>Terminalia ivorensis</i>)	26.5 ij
HJTA (<i>T. amazonia</i>)	20.7 jk
RED (<i>Eucalyptus deglupta</i>)	19.8 jk
HJED (<i>E. deglupta</i>)	8.4 kl
HJTI (<i>T. ivorensis</i>)	8.04 l
Pr > f	< 0.0001

Medias seguidas de la misma letra, por columna, no son significativamente diferentes según prueba de Duncan, ($p < 0.05$).

Anexo 2. N mineralizado acumulado de hojas verdes EP e IE (EP: *E. poeppigiana*, IE: *I. edulis*) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	N mineralizado acumulado ((mg/kg)								Pr>f
	Semanas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Hojas verdes									
EP	55.4	71.66	88	103.79	119.5	123.91	128.32	132.74	<0.0001
IE	49.5	53.34	57.2	78.41	99.6	125.69	151.78	177.9	<0.0001
Suelo (Testigo)	19.1	22.61	26.1	29.36	32.6	35.02	37.02	37.44	39.9

Anexo 3. N mineralizado acumulado de hojarasca de las especies leguminosas (*E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y maderables (*T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *C. alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED) y *C. arabica* (C) y el suelo solo (S) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	N mineralizado acumulado ((mg/kg)								Pr>f
	Semanas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Hojarasca									
HJEP	3.3	4.25	5.2	9.95	14.7	18.31	21.92	25.6	<0.0001
HJIE	24.8	27.19	29.6	30.74	31.8	33.53	35.26	37	<0.0001
HJTI	2.8	2.1	1.4	1.59	1.7	1.46	1.22	1.01	<0.0001
HJTA	17.6	9.97	2.4	3.4	0.7	0.82	0.94	1.02	<0.0001
HJCA	14.1	7.6	1.2	2.08	2.95	5.33	7.71	10.1	<0.0001
HJID	23.5	24.46	25.4	31.1	36.9	47.97	59.04	70.1	<0.0001
HJED	5.4	3.07	0.8	1.18	1.5	1.23	0.96	0.7	<0.0001
HJC	13.3	12.84	2.1	3.73	5.4	8.45	11.5	14.5	<0.0001
Suelo (Testigo)	19.1	22.61	26.1	29.36	32.6	35.02	37.44	39.9	<0.0001

Anexo 4. N mineralizado acumulado de las raíces de las especies leguminosas (*E. poeppigiana* (EP), *I. edulis* (IE), *I. densiflora* (ID) y maderables (*T. ivorensis* (TI), *T. amazonia* (TA), *C. alliodora* (CA), *E. deglupta* (ED) y *C. arabica* (C) y el suelo solo (S) en ocho semanas de incubación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	N mineralizado acumulado ((mg/kg)								Pr>f
	Semanas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Raíces									
REP	26.5	27.89	29.2	35.56	42	44.54	47.08	49.56	<0.0001
RIE	24.2	25.09	25.9	27.41	29	31.9	34.8	37.6	<0.0001
RTI	22.6	12.15	1.73	1.54	1.4	1.38	1.36	1.28	<0.0001
RTA	31.8	29.95	28.1	24.52	21	20.12	19.24	18.4	<0.0001
RCA	71.1	67.8	64.5	65.44	66.4	68.84	71.28	73.7	<0.0001
RID	26	22.2	18.4	20.36	22.3	24.49	26.68	28.8	<0.0001
RED	16.3	8.6	0.9	1.25	1.6	1.39	1.18	0.98	<0.0001
RC	12.1	13.5	14.9	18.44	22	25.19	28.38	31.5	<0.0001
Suelo									<0.0001
(Testigo)	19.1	22.61	26.1	29.36	32.6	35.02	37.44	39.9	

Anexo 5. Determinación de la materia seca y el % de N total de las plantas de maíz con la incorporación de material foliar y radicular de los tratamientos en 32 días de evaluación. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2004.

Tratamiento	Materia Seca (g)			% de N		
	Follaje	Raíz	Total	Follaje	Raíz	Total
HVEP	1.62	1.14	2.76	2.01	1.56	3.57
HVIE	0.49	0.54	1.03	0.87	0.89	1.76
HJEP	0.72	0.73	1.45	0.84	0.92	1.76
HJIE	0.5	0.58	1.08	0.88	0.84	1.72
HJID	0.5	0.68	1.18	0.79	0.71	1.5
HJED	0.41	0.61	1.02	0.77	0.61	1.38
HJCA	0.35	0.5	0.85	0.76	0.77	1.53
HJTA	0.38	0.55	0.93	0.75	0.72	1.47
HJTI	0.51	0.53	1.04	0.80	0.73	1.53
HJC	0.48	0.63	1.11	0.95	0.80	1.75
REP	0.37	0.44	0.81	0.73	0.70	1.43
RIE	0.43	0.51	0.94	0.85	0.86	1.71
RED	0.44	0.66	1.1	0.73	0.62	1.35
RCA	1.12	0.8	1.92	1.06	0.87	1.97
RTA	0.65	0.84	1.49	0.79	0.64	1.43
RTI	0.47	0.63	1.11	0.78	0.65	1.43
RC	0.68	0.66	1.34	0.86	0.87	1.73
S	0.35	0.44	0.79	0.73	0.69	1.42

Anexo 6. Contenido inicial de C y N y de la relación C/N en hojarasca y raíces en las dos especies evaluadas. Heredia, CICAPE Costa Rica, 2004.

Tratamiento	% N	% C	C/N
Hojarasca			
<i>Inga densiflora</i> (HJID)	2.94 a	47.99 a	16.32 d
<i>Coffea arabica</i> (HJC)	2.49 c	46.69 b	18.75 b
Raíces			
<i>Inga densiflora</i> (RID)	1.62 d	45.56 c	28.12 a
<i>Coffea arabica</i> (RC)	2.56 b	45.38 d	17.73 c

Valores con la misma letra no son significativamente diferentes según LSD Tukey, (p < 0.05)