

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
CATIE**

**PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

**Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de
árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y
convencional**

**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 al grado de:**

Magíster Scientiae

Por:

Edilberto Javier Montenegro Gracia

Turrialba, Costa Rica

2005

Esta Tesis ha sido aceptada en su presente forma por 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:

MAGÍSTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

Gabriela Soto Muñoz, M.Sc.
Consejera Principal

Ana Tapia, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Fernando Casanoves Boschetti, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Elías de Melo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Glenn Galloway, Ph.D.
**Director Programa de Educación y
Decano de la Escuela de Posgrado**

Edilberto Javier Montenegro Gracia
Candidato

DEDICATORIA

A Dios por estar siempre presente en cada uno de mis días de vida.

A mis hijos Jannei y Edilberto por ser comprensivos durante estos dos años de mi ausencia en sus vidas y por haberse convertido en la fuente de inspiración para el logro de esta nueva meta.

A mis padres por su muestra de cariño y apoyo incondicional en mis decisiones.

A mis hermanos por ser fuente de estímulos constante en la realización de este sueño anhelado.

A mi querida y especial abuela Dulcina que Dios me la siga conservando con vida y salud.

A la familia Caballero Valdez por su constante apoyo y muestra de cariño durante estos dos años de estudios de Maestría.

A mis compañeros de trabajo quienes pusieron la fe y la confianza en el momento ideal para continuar estudio superior fuera del país.

El Autor

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle primeramente a la Universidad de Panamá, en especial a la Sede de Bocas del Toro por el apoyo y confianza brindado durante los años de estudios.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por su valioso y oportuno apoyo económico, por su confianza y constante acercamiento con sus becarios y por ir más allá de ser sólo un organismo de financiamiento.

A mi profesora consejera Gabriela Soto por permitirme conocer de cerca sus experiencias como profesional y aportar sugerencias importantes en la realización de esta investigación, así como también por su orientación y la calidad humana brindada.

A los miembros del comité M.Sc Ana Tapia, Dr. Fernando Casanoves, M.Sc. Elías de Melo por sus constantes observaciones y recomendaciones en esta investigación.

Al proyecto MIP-AF/NORAD, por su valioso aporte económico y por permitirme utilizar las parcelas de café en el ensayo de comparaciones de sistemas.

Al personal de campo del proyecto que fueron pilares importantes durante la fase de evaluación.

Al personal técnico del Laboratorio de Suelo del CATIE, por la realización de los análisis químicos foliares.

A la Universidad de Costa Rica Sede del Atlántico (UCR) por su constante apoyo en la fase de campo y laboratorio.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), por permitirme realizar este estudio superior a nivel de Maestría en Agricultura Ecológica.

A todos mis amigos y compañeros de maestría y a la promoción 2003-2004, por compartir sus experiencias profesionales y culturales.

A todas las personas que aun no he mencionado pero que han sido importantes en la realización de esta investigación les doy un millón de gracias por el apoyo brindado.

Al personal de la Escuela de Posgraduados de CATIE por su permanente apoyo.

El Autor

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Hipótesis	2
2. ARTÍCULO 1	3
Aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de sombra (<i>Terminalia amazonia</i> , <i>Abarema idiopoda</i> , <i>Erythrina poeppigiana</i>) en sistemas de manejo orgánico y convencional en café	3
2.1. Introducción	3
2.2. Revisión de Literatura	4
2.2.1 Aspectos generales del café	4
2.2.2 La sostenibilidad	5
2.2.3. Sistemas agroforestales	5
2.3. Materiales y Métodos	10
2.3.1 Localización del estudio	10
2.3.2 Tratamientos y diseño experimental	10
2.3.3 Determinación de la biomasa vegetal	11
2.3.4 Análisis estadístico	12
2.4. Resultados y discusión	12
2.4.1 Aporte de biomasa	12
2.4.2 Aporte de nutrientes	14
2.5. Conclusiones	20
2.6. Recomendaciones	21
2.7. Literatura citada	22
3. ARTÍCULO 2	27
Liberación de nutrientes en residuos de poda y abono orgánico (broza de café) bajo la influencia de tres especies de sombra <i>E.poeppigiana</i> , <i>T.amazonia</i> , <i>A. idiopoda</i> y sistema de manejo convencional y orgánico en sistemas agroforestales de café	27
3.1. Introducción	27

3.2. Revisión de literatura	28
3.2.1 Composición de los residuos	28
3.2.2 Factores involucrados en los procesos de descomposición de leguminosas	29
3.2.3 Descomposición del material vegetal y liberación de nutrientes.....	29
3.2.4 Importancia de la fertilización en el agroecosistema.....	32
3.3. Materiales y Métodos.....	34
3.3.1 Localización del estudio	34
3.3.2 Tratamientos y diseño experimental	34
3.4. Resultados y discusión.....	36
3.4.1 Tasa de descomposición de los residuos.....	36
3.4.2 Liberación de la materia seca en broza.....	48
3.5. Conclusiones.....	56
3.6. Recomendaciones	58
3.7. Literatura citada	59
4. CONCLUSIONES GENERALES.....	63
ANEXO 1	64
ANEXO 2	65
ANEXO 3.....	67

Montenegro Gracia, E.J. 2005. Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 67p.

Palabras claves: *Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda*, café, orgánico, descomposición, liberación, poda.

RESUMEN

Se evaluó el aporte de la biomasa y la tasa de liberación de nutrientes de tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia* y *Abarema idiopoda*), bajo sistemas de manejo convencional y orgánico de café. Así como la tasa de liberación de nutrientes de la pulpa de café fresca adicionada como fertilizante en los sistemas orgánicos. El ensayo se realizó como parte de un estudio comparativo a largo plazo de sistemas de manejo y tipos de sombra establecidos en el CATIE en el año 2000, en Turrialba, Costa Rica (600 msnm y 2600 mm de precipitación). Se evaluaron los tratamientos medio orgánico (MO), medio convencional (MC) y alto convencional (AC) con sombra de *Erythrina* (E) y *Terminalia* (T) y medio orgánico y medio convencional con sombra de *Abarema* (A), bajo un diseño al azar con un arreglo factorial incompleto, con 8 tratamientos y 3 repeticiones. El mayor aporte de biomasa se obtuvo en los tratamientos MC y MO de *Erythrina* (11790 kg/ha y 10072 kg/ha respectivamente) contrastando con el AC de *Erythrina* (2407 kg/ha) y los aportes de *Terminalia* MC y MO (1270 y 1295 respectivamente). Para determinar la tasa de liberación se utilizaron bolsas de descomposición por 17 semanas. Los tratamientos de *Erythrina* MC y MO fueron los que aportaron mayor cantidad de nutrientes en el período estudiado tanto para N (144 kg/ha y 112,8 kg/ha, respectivamente) como para K (101 kg/ha y 90,83 kg/ha, respectivamente). La mayor tasa de liberación la presentó el tratamiento AC de *Erythrina*, y la más lenta se observa en el sistema MC de *Abarema*. La tasa de liberación de nutrientes a partir de la pulpa de café fresca no mostró variación entre los tipos de sombra, bajo el sistema orgánico. En conclusión el sistema de manejo y el tipo de árbol de sombra determinó el aporte de nutrientes de la poda así como la tasa de liberación. La selección del tipo de sombra y el manejo de la misma son factores a considerar en el establecimiento de sistemas sostenibles de producción de café.

Montenegro Gracia, E.J. 2005. Effect of nutrients supply of biomass from three types of shade trees in management systems of organic and conventional coffee. Thesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 67p.

Key words: *Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda*, coffee, organic, decomposition, release, pruning.

SUMMARY

The contribution of the biomass and the nutrient release rate of three shade trees (*Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia* and *Abarema idiopoda*), was determined under organic and conventional coffee farming systems, as well as the nutrient release of fresh coffee pulp added as fertilizer in the organic systems. The essay was developed within a long-term comparative study of farming systems and shade types established at CATIE, Turrialba, Costa Rica (600 msnm, 2600 mm rainfall). Treatments considered in this study were half organic (MO), half conventional (MC) and full conventional (AC) with *Erythrina* (E) and *Terminalia* (T) shade trees and half organic and half conventional with *Abarema* (A) as shade tree, under a random design with an incomplete factorial arrangement, with 8 treatments and 3 replicates. The largest biomass contribution was obtained with *Erythrina* MC and MO (11790 kg/ha and 10072 kg/ha respectively) contrasting with the AC of *Erythrina* (2407 kg/ha) and the contributions of *Terminalia* MC and MO (1270 and 1295 respectively). To determine the nutrient release rate litterbags were used for 17 weeks. *Erythrina* MC and MO present the higher release rate for all nutrients such as N (144 kg/ha and 112,8 kg/ha, respectively) and K (101 kg/ha and 90,83 kg/ha, respectively). AC of *Erythrina* showed the higher release rate, and the slowest is observed in the system MC of *Abarema*. Nutrient release rate from the fresh coffee pulp did not show changes among shade trees. In conclusion the farm system and the shade tree determined the nutrient release rate. The selection of the shade tree and the farming system are factors to be considering in the establishment of coffee sustainable farming systems.

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. ALGUNOS ÁRBOLES UTILIZADOS COMO SOMBRÍO PERMANENTES EN CAFETALES.....	7
CUADRO 2. MANEJO UTILIZADO PARA CADA NIVEL DE INSUMO EN EL ENSAYO COMPARATIVO DE SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA.....	10
CUADRO 3. COMBINACIÓN DE FACTORES PARA OBTENCIÓN DE TRATAMIENTOS DEL ENSAYO EN CAFÉ EVALUADO EN ESTE ESTUDIO.	11
CUADRO 4. CANTIDAD (KG) DE BIOMASA VEGETAL (PESO SECO) APORTADAS POR LA PODA DE E. POEPPIGIANA, A. IDIOPODA, T. AMAZONIA, BAJO SISTEMAS DE MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL, TURRIALBA, COSTA RICA. ...	14
CUADRO 5. CONTENIDO PORCENTUAL DE NUTRIENTES EN HOJA (PODA 1 ÉPOCA SECA) DE E. POEPPIGIANA, A. IDIOPODA, T. AMAZONIA, EN DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (ORGÁNICO Y CONVENCIONAL DE CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.	15
CUADRO 6. CONTENIDO PORCENTUAL DE NUTRIENTES EN HOJA (PODA 2 ÉPOCA LLUVIOSA) DE E. POEPPIGIANA, A. IDIOPODA, T. AMAZONIA, EN DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (ORGÁNICO Y CONVENCIONAL), EN SISTEMA AGROFORESTAL CON CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.....	15
CUADRO 7. APORTE DE NUTRIENTES (KG HA ⁻¹) DE LOS DIFERENTES ÁRBOLES DE SOMBRA Y ÉPOCA EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA 2004.	17
CUADRO 8. TENDENCIA DEL APORTE DE NUTRIENTES POR PODA EN MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.	18
CUADRO 9. APORTE DE NUTRIENTES (KG HA ⁻¹ AÑO ⁻¹) POR ÁRBOL DE SOMBRA (ERYTHRINA POEPPIGIANA, ABAREMA IDIOPODA, TERMINALIA AMAZONIA) EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.....	18
CUADRO 10. MANEJO UTILIZADO PARA CADA NIVEL DE INSUMO EN EL ENSAYO COMPARATIVO DE SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA.....	34
CUADRO 11. COMBINACIÓN DE FACTORES PARA OBTENCIÓN DE TRATAMIENTOS DEL ENSAYO EN CAFÉ EVALUADO EN ESTE ESTUDIO.	35
CUADRO 12. MATERIA SECA PORCENTUAL REMANENTE Y DESCOMPUESTA DE LOS RESIDUOS DE PODA DURANTE DIECISIETE SEMANAS BAJO SISTEMAS DE MANEJO DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL.....	37
CUADRO 13. PORCENTAJE DE NUTRIENTES LIBERADO EN RESIDUO DE PODA DE E. POEPPIGIANA, T. AMAZONIA, A. IDIOPODA, DURANTE DIECISIETE SEMANAS DE DESCOMPOSICIÓN EN CAMPO EN SISTEMAS DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL, TURRIALBA, COSTA RICA.....	39
CUADRO 14. ORDENAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE MANEJO SEGÚN LA TASA DE LIBERACIÓN DE NUTRIENTES DEL MÁS RÁPIDO AL MÁS LENTO EN SISTEMA AGROFORESTAL CON CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.	39
CUADRO 15. CANTIDAD TOTAL DE NUTRIENTES (KG/HA) LIBERADO DEL RESIDUO DE PODA DE ÁRBOLES DE SOMBRA (E. POEPPIGIANA, T. AMANZONIA, A. IDIOPODA) DESPUÉS DE 17 SEMANAS DE LA PODA BAJO SISTEMAS DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL, TURRIALBA, COSTA RICA.	46
CUADRO 16. ORDENAMIENTO DE ACUERDO CON LA CANTIDAD DE NUTRIENTES (KG HA-1) LIBERADO EN SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL DE CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.	47
CUADRO 17. PORCENTAJE DE NUTRIENTES LIBERADO DURANTE 119 DÍAS EN BROZA CON MANEJO ORGÁNICO EN SISTEMAS AGROFORESTAL CON CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA.....	50
CUADRO 18. CANTIDAD DE NUTRIENTES (KG/HA) LIBERADO EN RESIDUO DE ABONO ORGÁNICO (BROZA DE CAFÉ) DURANTE DIECISIETE SEMANAS EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ ORGÁNICO, TURRIALBA, COSTA RICA. ...	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. APORTE DE BIOMASA (KG HA^{-1}) POR TRATAMIENTOS EN DIFERENTES ÉPOCAS DE PODAS (PODA 1: ÉPOCA SECA, PODA 2: ÉPOCA LLUVIOSA) EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, TURRIALBA, COSTA RICA	14
FIGURA 2. PORCENTAJE DE MATERIA SECA DE RESIDUO DE PODA REMANENTE EN EL TIEMPO PARA DIFERENTES ÁRBOLES DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA) EN UNA COMPARACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL, TURRIALBA, COSTA RICA.	38
FIGURA 3. PORCENTAJE DE LIBERACIÓN DE NITRÓGENO EN RESIDUOS DE PODA DE ERYTHRINA (E), TERMINALIA (T), ABAREMA (A) BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (AC, MC, MO) EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, CATIE, TURRIALBA, COSTA RICA.	40
FIGURA 4. PORCENTAJE DE LIBERACIÓN DE FÓSFORO EN RESIDUOS DE PODA DE ERYTHRINA (E), TERMINALIA (T), ABAREMA (A) BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (AC, MC, MO) EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, CATIE, TURRIALBA, COSTA RICA.	42
FIGURA 5. PORCENTAJE DE LIBERACIÓN DE POTASIO EN RESIDUOS DE PODA DE ERYTHRINA (E), TERMINALIA (T), ABAREMA (A) BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (AC, MC, MO) EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, CATIE, TURRIALBA, COSTA RICA.	43
FIGURA 6. PORCENTAJE DE LIBERACIÓN DE MAGNESIO EN RESIDUOS DE PODA DE ERYTHRINA (E), TERMINALIA (T), ABAREMA (A) BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (AC, MC, MO) EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, CATIE, TURRIALBA, COSTA RICA.	44
FIGURA 7. PORCENTAJE DE LIBERACIÓN DE CALCIO EN RESIDUOS DE PODA DE ERYTHRINA (E), TERMINALIA (T), ABAREMA (A) BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO (AC, MC, MO) EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ, CATIE, TURRIALBA, COSTA RICA.	45
FIGURA 8. PORCENTAJE DE MATERIA SECA DESCOMPUESTA DE BROZA (ABONO ORGÁNICO) DURANTE DIECISIETE SEMANAS EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ ORGÁNICO, CON ESPECIES DE SOMBRA ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA, TURRIALBA, COSTA RICA.	49
FIGURA 9. PORCENTAJE DE NITRÓGENO LIBERADO POR SEMANA EN RESIDUO DE BROZA EN SISTEMA ORGÁNICO DE CAFÉ, CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA), TURRIALBA, COSTA RICA.	51
FIGURA 10. PORCENTAJE DE FÓSFORO LIBERADO POR SEMANA EN RESIDUO DE BROZA EN SISTEMA ORGÁNICO DE CAFÉ, CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA), TURRIALBA, COSTA RICA.	52
FIGURA 11. PORCENTAJE DE POTASIO LIBERADO POR SEMANA EN RESIDUO DE BROZA EN SISTEMA ORGÁNICO DE CAFÉ, CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA), TURRIALBA, COSTA RICA.	53
FIGURA 12. PORCENTAJE DE MAGNESIO LIBERADO POR SEMANA EN RESIDUO DE BROZA EN SISTEMA ORGÁNICO DE CAFÉ, CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA), TURRIALBA, COSTA RICA.	54
FIGURA 13. PORCENTAJE DE CALCIO LIBERADO POR SEMANA EN RESIDUO DE BROZA EN SISTEMA ORGÁNICO DE CAFÉ, CON TRES DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA (ERYTHRINA, TERMINALIA, ABAREMA), TURRIALBA, COSTA RICA.	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición del problema

En la última década la caficultura en América Central ha experimentado una diversificación de modelos de producción. Muchos de los modelos de alto insumos han sido criticados por contaminar el ambiente, tener una rentabilidad riesgosa y ser poco accesibles para los productores de escasos recursos (Samper 1999). La aplicación continua y elevada de fertilizantes no parece ser una opción sostenible para el tercer mundo, ya que los precios de los energéticos son muy elevados y su uso contribuye a contaminar los mantos acuíferos. La utilización de herbicidas es otro contribuyente al deterioro de los sistemas de producción cafetalera promoviendo la erosión superficial del suelo y consecuentemente la pérdida de la materia orgánica y la lixiviación de nutrientes hacia las capas más profundas del suelo (Vaast y Snoeck 1999). Estos problemas se fueron acrecentando cuando se incentivaron en los agroecosistemas tradicionales, las plantaciones de café sin sombra con altas densidades de cultivares de porte bajo. Estos sistemas promovieron poca protección del suelo y al momento de la poda, baja restitución de la materia orgánica, bajo reciclaje de nutrientes y alta exportación de los mismos, lo que lleva a los agricultores a depender considerablemente de los insumos químicos.

Debido a estos factores se hace necesaria la búsqueda de alternativas más eficientes para obtener la más alta producción al menor costo posible (económico y ambiental). Lo que ha motivado la diversificación de cafetales por medio de los sistemas agroforestales (SAF) para lograr combinar muchos beneficios de un sistema agrícola con la de un sistema forestal creando beneficios directos como la obtención de productos múltiples, mejorar las características físicas químicas y biológicas del suelo logrando minimizar los efectos erosivos y un mejor microclima para la producción de café (Muschler 2000 y Soto *et al.* 1993). Una de las alternativas que se ha propuesto para mitigar el daño causado a los sistemas de producción ha sido el manejo orgánico. Porque permite conservar, restaurar y mejorar el recurso suelo a la vez que reduce la dependencia de insumos externos. Sin embargo existen pocos estudios de sistemas comparativos orgánico y convencional.

Montagnini y Jordan (2002) ponen de manifiesto que para incrementar la sustentabilidad de un sistema agrícola es importante la incorporación de especies que posea adaptaciones dirigidas a una mejor captura y conservación de nutrientes, al mismo tiempo que produzca una cosecha de valor económico o de subsistencia, para esto sugieren selección de especies y diseños que promuevan la conservación de nutrientes.

Por su parte la hojarasca, los residuos de poda del café y de árboles asociados puedan contribuir en gran parte a la demanda de nutrimento (Vaast y Snoeck 1999; Coyne 1999). De aquí la

necesidad de estudiar su aporte y comportamiento de liberación de nutrientes de diferentes especies de sombra y sistemas de manejos en cafetales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Evaluar el aporte de la biomasa y los nutrientes, la tasa de descomposición y liberación en residuo de poda de *Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia* y *Abarema idiopoda* en los sistemas de manejo convencional y orgánico.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estimar el efecto de la poda (aporte de biomasa y dinámica de nutriente) de los árboles de sombra *Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema* por sistema de manejo en la época seca y lluviosa
- Determinar la tasa de descomposición y liberación de nutrientes de los residuos vegetales de *Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema* en sistema de manejo convencional y orgánico durante 17 semanas.
- Evaluar la tasa de descomposición y liberación de nutrientes de la broza de café en sistemas orgánico con diferentes especies de sombra (*E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda*).

1.3. Hipótesis

- ❖ La poda de los árboles de *Erythrina poeppigiana*, *Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda* contribuyen a mejorar la dinámica de nutrientes en el sistema con manejo orgánico.
- ❖ Existen diferencias entre las especies leguminosas y no leguminosa en el aporte de biomasa y nutrientes en cada sistema de manejo.
- ❖ Existen diferencias estadísticas entre la tasa de descomposición y liberación de nutrientes en los residuos de poda dentro de las especies leguminosas y no leguminosa.
- ❖ Las especies de sombra influyen en la tasa de descomposición y liberación de nutrientes en broza de café.

2. ARTÍCULO 1

Aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de sombra (*Terminalia amazonia*, *Abarema idiopoda*, *Erythrina poeppigiana*) en sistemas de manejo orgánico y convencional en café

2.1. Introducción

Entre el siglo XIX y la primera década del XX, en algunas zonas la caficultura evidenciaba ciertos problemas asociados a la reducción de la fertilidad del suelo y consecuentemente una baja en los rendimientos (Samper 1999). Las constantes caídas de precios en el mercado internacional del café y el aumento en los costos de producción (Founier 1988) han provocado la búsqueda de alternativas de producción más rentables (Payán *et al.* 2002).

En los trópicos húmedos, la productividad del suelo depende de la conservación y el reciclaje de nutrientes dentro del sistema suelo-planta (Cody *et al.* 2000). Por esto, tradicionalmente se ha promovido el uso de especies arbóreas, que además de ofrecer el servicio de sombra para el cultivo de café también aportan productos comerciales (Galloway y Beer 1997), extraen los nutrientes de las capas más profundas del suelo (Fischersworing y Robkamp 2001) que luego se depositan en la superficie en forma de residuos orgánicos de hojas, raíces y residuos de podas, constituyéndose en una fuente de reciclaje de nutrientes para los cultivos (Beer 1988; Fassbender 1993; Young 1999).

Estos sistemas agroforestales, están caracterizados por podas frecuentes para reducir la competencia con los cultivos (especialmente la radiación solar), aumentar la biomasa del suelo e incorporar nutrientes al sistema (Chesney *et al.* 2000).

En evaluaciones recientes de tipos y frecuencias de poda Berninger y Salas (2003) encontraron que los árboles de *Erythrina lanceolata* sin poda aportaron mayor producción de biomasa, seguido de la poda parcial (50%) cada tres meses y que la poda total cada seis meses fue la que menor o más baja producción de biomasa generó. Sin embargo, Duguma *et al.* (1988) indican que podas frecuentes pueden conducir a una disminución en la producción de biomasa y una muerte lenta de los árboles debido al desgaste de las reservas (azúcares y almidón).

Chesney *et al.* (2001), encontraron diferencias en el aporte de nitrógeno en *Erythrina poeppigiana* bajo dos sistemas de poda y con diferentes edades de la plantación, en podas parciales los árboles de dos y ocho años de edad depositaron al suelo 187 y 256 kg N ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente, valores 50% mayores que los observados en la poda completa. Existe poca información referente al

aporte de las podas bajo sistema de manejo orgánico y convencional con diferentes tipos de árboles de sombra. Arana (2003), encontró en cafetales orgánicos con *E.poeppigiana* un aporte de biomasa de 18.368 kg ha⁻¹ con 256 kg N ha⁻¹ en CATIE, Turrialba, y en Paraíso de Cartago 17.286 kg ha⁻¹ con 226 kg de N ha⁻¹.

En cuanto a la especie *Terminalia amazonia*, Aguilar *et al.* (2001) manifiestan que esta requiere de podas más drásticas y tempranas de las ramas inferiores después del primer año en plantaciones de café. Cordero *et al.* (2003) reportaron para esta especie, al cabo de 10 años con densidades de 1111 plantas ha⁻¹, un aporte de 91.7 t ha⁻¹ de biomasa seca.

Es fundamental adecuar la fertilización según las exportaciones (Ramírez 1997), y según el sistema de manejo (sombra, pleno sol) debido a que la demanda de nutrientes varía entre sistemas y con el cultivo. Una de las mayores limitantes que deben enfrentar los sistemas de producción orgánicos, en busca de su sostenibilidad es el aporte de nutrientes como el nitrógeno. Por tanto es importante buscar una eficiente sincronía entre abonos orgánicos y manejo de los aportes de los árboles de sombra. En café Chavez y Molina (2002) reportan que los cultivares Costa Rica 95 y Catuaí extraen del suelo 256 kg de K ha⁻¹, 242 kg de N ha⁻¹, 141 kg de Ca ha⁻¹, 34 kg de Mg ha⁻¹, 21 kg de P ha⁻¹ y 216 kg de K ha⁻¹, 174 kg de N ha⁻¹, 836 kg de Ca ha⁻¹, 18 kg de Mg ha⁻¹, 15 kg de P respectivamente.

Con base en estas necesidades el objetivo de la presente investigación se fundamentó en estimar el efecto de las podas (aporte de biomasa y dinámica de nutrientes) de los árboles de sombra (en época seca y lluviosa) presentes en el sistema de manejo orgánico y convencional de café.

2.2. Revisión de Literatura

2.2.1 Aspectos generales del café

El café es uno de los cultivos ideales para la producción agroforestal, siendo una planta originaria de los ecosistemas forestales. Para un buen crecimiento, floración y fructificación se requiere de un microclima fresco con semisombra y suficiente humedad propiciada por especies forestales (Fischersworing y Robkamp 2001).

Estudios han demostrado que el café se desarrolla en diferentes ambientes con altitudes que van desde los 400 a 2000 msnm. Sin embargo, para obtener la mejor calidad este requiere de altitudes entre los 1200 a 2000 msnm (Fischersworing y Robkamp 2001). Las condiciones climáticas ideales de temperatura anual debe estar entre los 17 y 23 ° C, la precipitación entre 1600 y 2800 mm año⁻¹, con una distribución anual mínima entre 145 y 245 días (Icafé1998). El suelo debe tener un buen drenaje, son preferibles suelos con profundidad no menor de un metro, de color oscuro, ricos en nutrientes especialmente potasio y materia orgánica con textura franca (Fischersworing y Robkamp 2001).

2.2.2 La sostenibilidad

La sostenibilidad es la capacidad de cosechar a perpetuidad cierta biomasa de un sistema, que tiene la condición de renovarse por sí mismo o que su renovación no está en riesgo. Gliessman (2002) sugiere que la agricultura sustentable proporciona rendimiento sostenido a largo plazo, haciendo uso al menos de los recursos dentro del agroecosistema, reemplazando los insumos externos con un mejor ciclo de nutrientes, con la finalidad de reducir costo y aumentar la eficiencia y la viabilidad económica de los productores.

Altieri y Nicholls (2002) en un estudio de caso en Costa Rica encontraron que el cafetal orgánico con sombra tiene mejores indicadores de calidad de suelo y salud del cultivo por encima del umbral de la sostenibilidad establecido con valor de 5, en relación al café convencional sin sombra, siendo los valores encontrados en café orgánico 9,5 y 7,5 y los encontrados en café convencional 5,8 y 4,2 para calidad de suelo y salud del cultivo respectivamente.

2.2.3. Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) son la interacción bioeconómica en una misma área de un componente leñoso y perenne con cultivo y/o animales asociados en forma simultánea o secuencial que incorporan cuatro características importantes: estructura, sostenibilidad, productividad, y adaptabilidad cultural y socioeconómica (Somarriba 1998; Farell y Altieri 1999). Los SAF pueden verse como una alternativa para el uso y manejo de los recursos naturales en regiones tropicales y sub tropicales. Estos pueden ser utilizados en diferentes escalas geográficas y ecosistemas frágiles como estables, a nivel de subsistencia o comerciales, cumpliendo diferentes funciones de importancia en los sistemas como: diversificar la agricultura, aumentar el nivel de MO en el suelo, fijar nitrógeno atmosférico, reciclar nutriente, modificar el microclima y optimizar la producción del sistema, en función del rendimiento sostenido (Gliessman 2002). Benzing (2001) manifiesta que los sistemas agroforestales bien diseñados pueden ayudar a que lo ecológicamente necesario se vuelva a su vez económicamente atractivo para los agricultores.

La productividad sostenible de los sistemas agroforestales se debe al uso de energía y a la característica de los árboles (Gliessman 2002). Estos tienen la capacidad de alterar drásticamente las condiciones del ecosistema del cual forma parte (Rifsnyder y Darnhofer 1989, Farell 1990). En esta dirección, uno de los factores importantes atribuido a los árboles de sombra es mejorar la calidad del café (Salazar *et al.* 2000), mejorar la viabilidad económica, la sostenibilidad y la biodiversidad en la producción cafetalera (Vaast 1999) el mejoramiento de los sistemas (Fischersworing y Robkamp 2001) aumentar la vida útil de los cafetales y fomentar el desarrollo de ramas primarias y secundarias del café.

Según Beer (1988); Rao *et al.* (1998) bajo el suelo, las raíces de los árboles penetran a niveles más profundos que las de los cultivos anuales; que consecuentemente favoreciendo la estructura del suelo, el reciclaje de nutrientes y las relaciones de humedad del suelo (Gliessman 2002). Sobre el suelo el árbol altera el ambiente de luz mediante la sombra, y con niveles de 40 a 60 % se reducen o suprimen los problemas fitosanitarios utilizando de 2 a 4 especies o más, esto ocurre en zonas bajas y secas; mientras que un 20 y 40 % de sombra ocurre en zonas bajas y húmedas, lo cual afecta la humedad y evapotranspiración debido al manejo y característica de las copas (Imbach *et al.* 1989; Haggar y Staver 2001; Guharay *et al.* 2001).

Las hojas caídas juegan un papel importante al proveer cobertura al suelo modificando el ambiente edáfico, conforme se descompone, esta hojarasca se convierte en fuente importante de materia orgánica y activando el ciclo biogeoquímico (Altieri. 1999; Gliessman 2002). Los árboles permiten una captura más eficiente de la energía solar y favorecen la adsorción, retención o captura de carbono y nitrógeno sobre y bajo el suelo (Shepherd y Montagnini 1999; Arana 2003; Beer *et al.* 2003). Además, reciclan nutrientes y mantienen el sistema en un estado de equilibrio dinámico, al reducir la dependencia del sistema sobre insumos externos (Gliessman 2002).

2.2.3.1 Comportamiento de los sistemas convencional y orgánico

Por los altos costos de mantenimiento existen en el mundo pocos estudios comparativos de sistema orgánico y convencional en cultivos perennes. Oberholzer *et al.* (2000a) estudiaron por 20 años el comportamiento en finca de producción orgánica y convencional con cultivos anuales y determinaron el efecto sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo y encontraron que la cantidad de abono orgánico aplicado ejerce un efecto significativo en los parámetros microbiológicos del suelo. Sin embargo esto no se encontró para los tres sistemas convencionales: la biomasa microbiana era casi inalterada por la cantidad de abono siendo estable durante los ocho años (1990-1998) del ensayo. Oberholzer *et al.* (2000b), realizaron un estudio comparativo con cereales en fincas orgánicas y fincas integrales y determinaron que las fincas orgánicas tienen un efecto positivo en los microorganismos del suelo y su actividad; de acuerdo a esto los resultados indican que los sistemas orgánicos e integrales son absolutamente variables, aunque estos resultados no pueden ser generalizados porque más del 50% de las fincas evaluadas no dieron diferencias significativas.

2.2.3.2 Características de especies arbóreas aptas para el sombrío

Para la selección y priorización de atributos claves de compatibilidad de especies arbóreas con café, se identifican aquellas especies maderables, frutales y de servicio que mejor se adapten a los objetivos del productor, los requerimientos del cultivo y a las condiciones ambientales existentes en

una región sea Costa Rica (Linkimer *et al.* 2002) o México (Yépez *et al.* 2002). En Pérez Zeledón las especies maderables más utilizadas en asociación con el café son *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*; la razón principal de preferencia por el productor se debe a que se facilita el manejo del café cuando se utiliza estas especies con bajas densidades 200 árboles ha⁻¹ (Tavares *et al.* 1999). El género *Terminalia* presenta un rápido crecimiento y producción de biomasa mayor que el *Eucalyptus*, lo cual indica que puede ser más competitivo por los recursos, principalmente el agua, debido a la alta tasa de actividad estomática que presenta (Gutiérrez y Vaast 2002).

Cuadro 1. Algunos árboles utilizados como sombrío permanentes en cafetales

Leguminosas	Maderables
<i>Inga densiflora</i>	<i>Vides cymosa</i>
<i>Inga spectabilis</i>	<i>Tetrorchidium boyacanum</i>
<i>Inga edulis</i>	<i>Marcia popayanenses</i>
<i>Erythrina poeppigiana</i>	<i>Ochroma pyramidale</i>
<i>Erythrina fusca</i>	<i>Cedrela odorata</i>
<i>Erythrina edulis</i>	<i>Cedrela montana</i>
<i>Pseudocacia spectabilis</i>	<i>Jacaranda caucana</i>
<i>Ibizzia carbonaria</i>	<i>Tabebuia chrysantha</i>
<i>Pithecellobium saman</i>	<i>Tabebuia rosea</i>
<i>Enterobium cyclocarpum</i>	<i>Cordia alliodora</i>
<i>Leucaena leucocephala</i>	
<i>Gliricidia sepium</i>	

Fuente: Fischersworing y Robkamp: Guía para la caficultura ecológica 2001.

2.2.3.3 Características particulares de las especies utilizadas en sistemas agroforestales con café

2.2.3.3.1 *Erythrina poeppigiana* (Walp) D.F. Cook

Es una especie que se distribuye en América Tropical, desde Panamá hasta Bolivia, pertenece a la familia de la Fabaceae, alcanza altura entre los 20 y 25 m, y un DAP medio 1.2 m hasta 2 m. En Costa Rica es conocido como poró o poró gigante. Se encuentra en altitudes de 600 hasta 1700 msnm, con temperatura promedio anual de 18 a 28 °C y precipitación de 1000 a 1300 mm. El uso más común es en sistemas agroforestales, en especial como sombra en cafetales, debido a su capacidad de fijar nitrógeno, gran producción de nódulos y gran tolerancia a podas frecuentes durante largo tiempo que permite ajustar la sombra al cultivo principal, además que de producir grandes cantidades de hojarasca rica en nitrógeno (4.1 - 4.9 %); de aquí el valor de la especie en conservar y mejorar el suelo y contribuir a rendimientos elevados y sostenibles de los cultivos asociados (CATIE 2000; Cordero 2003).

2.2.3.3.2 *Terminalia amazonia* (J:F:Gmel) Exell

Esta especie pertenece a la familia Combretaceae, en América Central y Panamá se le conoce como roble coral, amarillón o amarillo real. Alcanza alturas entre 50 a 70 metros y DAP de 1 a 3 m con fuste recto, en sitios de alta producción se han obtenido promedio de $11.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, su madera es de buena calidad (Cordero *et al.* 2003), con múltiples usos en la industria e incluso para producir papel (CATIE. 2000); esta especie es un buen candidato para plantar a altitudes de 40 a 1200 msnm CATIE (2000), con precipitaciones de 2500 a 3000 mm y temperaturas superiores a las 28°C , crece en diferentes tipos de suelo (rojos y pobres) pero su crecimiento óptimo se da en suelos arcillosos a francos con pH ácido a neutro (4 a 7). En cuanto a biomasa seca, se reporta para la especie 91.7 tm ha^{-1} a los 10 años de edad con densidades de 1111 planta ha^{-1} fijando 45.4 tm ha^{-1} de carbono (Cordero *et al.* 2003). No se ha encontrado reporte de esta especie en Turrialba.

2.2.3.3.3. *Abarema idiopoda* (Blake) Barneby & Grimes

A esta especie leguminosa fijadora de nitrógeno se le conoce con diferentes nombres científicos: *Albizia idiopoda* (Blake) Britton y Rose; *Pithecellobium idiopodium* S.F; *Pithecolobium idiopoda*; *Chloroleucon eurycyclum*. Se encuentra en México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Próspera en bosque tropical húmedo, bosque nublado, semideciduo, en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1500 msnm (Cordero *et al.* 2003).

Abarema idiopoda tiene un alto valor comercial, por ende económico, debido a sus diferentes usos (madera, leña, construcción). Además, otras características particulares de la especie son las raíces con propiedades insecticidas, el follaje denso con copa alta y abierta y color verde intenso y alto contenido de nitrógeno. En cafetales es compatible con otros árboles de copa altas o bajas ya sean compactas o abiertas, se acostumbra plantarla con otras especies de sombra y servicio. Requiere de poda de formación debido a sus ramificaciones irregulares o mal formadas (Cordero *et al.* 2003). No se ha encontrado reporte de *Abarema* en uso tradicional en asocio con café en finca cafetalera.

2.2.3.4 Aporte de biomasa y nutrientes por los árboles de sombra en los sistemas

La biomasa vegetal representa la principal reserva de nutrientes del ecosistema. Por ello, para comprender el proceso de ciclaje de nutrientes es necesario conocer la biomasa del ecosistema por unidad de área (Montagnini y Jordan, 2002). Un buen diseño de manejo del sistema debe garantizar el uso eficiente de los nutrientes, conociendo de antemano que el beneficio que proporcionan los árboles varían entre sistemas, se deben tener en cuenta las prácticas de manejo que se le brinde y el objetivo

que se persigue determinan el rendimiento en biomasa y la calidad (Sánchez *et al.* 1993; Cordero *et al.* 2003).

Estudios realizados por Sánchez *et al.* (1993) consideran que al someter la *Erythrina* a condiciones de precipitación poco estables, y suelos poco fértiles, se logra una producción de 2639 kg ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa seca y esta recircula 44 kg ha⁻¹ de N, 29 kg ha⁻¹ de K, 11 kg ha⁻¹ de Ca, 8 kg ha⁻¹ de Mg, y 4 kg ha⁻¹ de P, por año.

Alpizar *et al.* (1983) al evaluar, la *E. poepiggiana* en un sistema agroforestal con café encontraron un aporte de biomasa seca de 12,587 kg ha⁻¹ año⁻¹, y que entre ramas y hojas recircularon 286 kg ha⁻¹ de N, 183.87 kg ha⁻¹ de K, 122.03 kg ha⁻¹ de Ca, 42.80 kg ha⁻¹ Mg y 24.35 kg ha⁻¹ de P. Mientras que Chesney *et al.* (2001) reportan que los árboles podados de dos y ocho años de edad aportaron al suelo 187 y 256 kg N ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente.

Montagnini *et al.* (1995) estudiaron la relación del contenido de elementos en la biomasa entre especies nativas, encontrando que el nitrógeno, magnesio y potasio se encuentran en mayor concentración en la hojas, sugiriendo un buen potencial para la recirculación de estos nutrientes, Sin embargo, las concentraciones de calcio y fósforo resultaron similar en hojas, ramas y raíces, lo cual implica un potencial similar tanto para la retención como para la recirculación de estos nutrientes.

Por otro lado, Montagnini (2000) al comparar especies nativas en rodales puros y mixtos encontró que en rodales puros las ramas y el follaje sumados representan entre el 25 y 35 % de la biomasa aérea total, pero en general representaron cerca del 50% de los nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) de la biomasa arbórea. Sin embargo, en la biomasa de los rodales mixtos se obtuvieron los mayores contenidos de nutrientes para todos los elementos considerados, lo cual demuestra la necesidad de trabajar en sistemas agroforestales con dos o más especies.

En plantaciones de 10 años de *Terminalia amazonia* Cordero *et al.* (2003) encontraron aportes de biomasa de 91.7 t ha⁻¹. Montagnini (2000) en plantaciones puras de *Terminalia* encontró mayor cantidad de fósforo y magnesio en el tronco.

Por otra parte, Di Stéfano y Fournier (1998) evaluaron la biomasa de *Vochysia gautemalensis*, y encontraron que esta especie aporta 32.3 t ha⁻¹ de biomasa seca, 7000 kg ha⁻¹ N, 850 kg ha⁻¹ P, 5000 kg ha⁻¹ de Ca, 1125 kg ha⁻¹ Mg y 7250 kg ha⁻¹ K, al menos el 50% de los nutrientes se quedarían en el sitio si las hojas y ramas no se extrajeran, excepto para el potasio que solo representaría el 39%.

2.3. Materiales y Métodos

2.3.1 Localización del estudio

La presente investigación se realizó como parte de un ensayo establecido con una visión a largo plazo (20 años), para evaluar las interacciones agroecológicas en diferentes sistemas agroforestales (combinaciones de manejo y sombra) en café.

Este ensayo se realizó en un área de 9.2 hectáreas de la finca experimental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica. El sitio del ensayo esta localizado en el sector Bonilla 2, con las siguientes coordenadas 9° 53' 44" latitud norte, 83° 40' 7" longitud Oeste, con una elevación aproximada de 600 msnm. El clima es trópico húmedo, con temperatura media anual de 22°C, precipitación anual de 2600 mm. Los suelos se caracterizan como aluviales mixtos, Ultisol e Inceptisol, con textura entre franco y franco-arcilloso (primeros horizontes). (McDaniels 2001). El ensayo consiste en lotes de café caturra plantado a 2x1 m, con tres diferentes tipos de sombra: *E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda*, plantadas a 6x4 m, bajo diferentes sistemas de manejo orgánico y convencional (Cuadro 2).

Cuadro 2. Manejo utilizado para cada nivel de insumo en el ensayo comparativo de sistemas orgánico y convencional con tres diferentes tipos de sombra.

Nivel de insumo	Fertilización *	Control de maleza	Podas
Alto convencional (AC)	800 kg ha/año 18-5-15-6-2. 45kg/ha/año NH ₄ N ₃ , foliares B,Zn.	Uso de herbicida en toda el área del tratamiento.	En poró dos podas totales por año. En Terminalia se realiza dos podas de formación por año.
Medio convencional (MC)	400 kg/ha/año 18-5-15-6-2 45 kg/ha/año NH ₄ N ₃ , Foliares: B, Zn.	Uso de herbicidas en la entre calle con control selectivo de maleza y aplicación total en hilera.	En poró dos podas parciales por año. En Terminalia y Abarema se realiza dos podas de formación por año.
Medio orgánico (MO)	Broza 10 t/ha/año, 7.5 t/ha/año de Gallinaza, Roca fosfórica 200kg/ha/año, KMag 200 kg/ha/año.	Manejo mecánico (Azadón, Motoguadaña). Selectivo de malezas	En poró dos podas parciales por año. En Terminalia y Abarema se realiza dos podas de formación por año.

* Programa de fertilización año 2004

2.3.2 Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos (Cuadro 3), surgen de la combinación de los factores tipos de especies de árboles de sombras, *Erythrina poeppigiana*, *Abarema idiopoda*, *Terminalia amazonia* y el factor grado

de manejo con los niveles (alto convencional, medio orgánico, medio convencional). El sistema con *A. idiopoda* no cuenta con el tratamiento alto convencional.

El ensayo fue conducido bajo un diseño de bloque al azar con un arreglo factorial incompleto con ocho tratamientos y tres repeticiones. Las variables analizadas fueron: contenido porcentual de nutrientes por especies y sistemas de manejos, aporte de biomasa vegetal y nutrientes kg/ha para cada sistema.

Cuadro 3. Combinación de factores para obtención de tratamientos del ensayo en café evaluado en este estudio.

Especies	Insumo	Tratamientos
Erytrina poeppigiana (E)	Alto Convencional (AC)	AC E, MO E, MC E
Terminalia amazonia (T)	Medio Orgánico (MO)	AC T, MO T, MC T
Abarema idiopoda (A)	Medio Convencional (MC)	MO A, MC A.

2.3.3 Determinación de la biomasa vegetal

Se realizaron dos podas al año, una en febrero del 2004 (época seca) y la segunda en junio del mismo año (época lluviosa). Para la cuantificación del aporte de biomasa de las podas se tomaron cuatro árboles de sombra al azar en cada tratamiento. Para cada árbol muestreado, se pesó en libras con una romana *in situ*, la biomasa total de la poda (hojas y ramas). La biomasa promedio fue transformada a kilogramos y multiplicada por el número de árbol por hectárea. Para la determinación del peso seco, se tomaron tres submuestras al azar de la poda por tratamiento. Estas fueron secadas en el horno a 65°C hasta peso constante.

La segunda poda se realizó en el mes de junio (época lluviosa), se separaron hojas y ramas, La poda para *E. poeppigiana*, se hizo en forma diferenciada por tratamiento: en el alto convencional la poda fue total, en el medio orgánico y medio convencional la poda fue alternada entre árboles (poda de regulación de sombra y poda de descubre total). Con los otros árboles la poda fue parcial en todos los sistemas de manejo.

Los contenidos de nutrientes en la biomasa para ambas podas fueron determinados por el laboratorio de análisis de suelo, tejido vegetal y agua del CATIE, utilizando las siguientes metodologías: para el nitrógeno total se utilizó el método de Semimicro Kjeldahl (CATIE 1990); El fósforo se determinó por el método calorimétrico del extracto de digestión nítrico-perclórica; el K, Ca, Mg, se determinaron por espectrometría de absorción atómica (CATIE 1990). Las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg obtenidas por árbol de sombra y manejo se multiplicaron por la biomasa correspondiente, para obtener el aporte (kg/ha) de cada nutriente por especie y parcela.

2.3.4 Análisis estadístico

Para ambas podas, los datos obtenidos fueron analizados mediante la técnica de análisis de varianza, utilizando el programa estadístico InfoStat (2004), para un DBCA. Los pesos secos de biomasa y el aporte de nutrientes fueron transformados a kg ha^{-1} antes de realizar el análisis de varianza. Los promedios fueron comparados mediante una prueba de rangos múltiples de Duncan ($p < 0.05$).

2.4. Resultados y discusión

2.4.1 Aporte de biomasa

La variable biomasa de poda uno fue transformada con logaritmo natural para lograr la correcta adecuación del modelo. La diferencia en aportes de biomasa de los distintos sistemas en la poda uno resultó significativa ($p = 0.0036$). *E. poeppigiana* con los sistemas de manejo medio convencional (MCE) y medio orgánico (MOE), *Abarema* en el medio orgánico (MOA) y medio convencional (MCA) y el alto convencional de *Terminalia* (ACT) fueron los tratamientos que mayor aporte de biomasa brindaron (Cuadro 4). El alto convencional con poda total solo aportó $177.46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ poda}^{-1}$ de biomasa y resultó diferente del resto. Esto posiblemente se deba a la época (verano) y a la práctica cultural de manejo que se realiza en este sistema previo a la poda, consistente en la eliminación de brotes para evitar ramas grandes y gruesas. El tipo de poda efectuado (total) está asociado a la disminución del aporte de biomasa porque retarda la recuperación rápida del área foliar. Chesney *et al.* (2001) encontraron en *Erythrina* la mayor producción de biomasa de los árboles con poda parcial y esto puede atribuirse al más rápido rebrote de estos árboles comparados con la poda completa.

En cuanto a la segunda poda hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.0001$), siendo los sistemas de manejo MC y MO de *Erythrina* los que aportaron mayor biomasa (Cuadro 4), diferenciándose de los otros tratamientos en especial de ACE, por las razones antes expuestas. Es interesante observar que en el caso de *Terminalia* el comportamiento fue exactamente a la inversa, donde el ACT presentó una producción de biomasa 300% mayor que el MCT y el MOT. Una posible causa es la respuesta de una especie maderable no leguminosa a la fertilización mineral que hace que la producción de biomasa en el tratamiento convencional haya sido mayor. Cabe mencionar que las podas en *Terminalia* son podas de formación como una práctica de manejo silvicultural variando en su intensidad según la época. Mientras que *Abarema* no difiere estadísticamente entre los diferentes manejos se observa que en la época lluviosa su producción de biomasa se reduce, lo cual parece indicar que es una especie de lenta recuperación después de la poda.

Al comparar el aporte de biomasa de la primera poda en relación con la segunda poda, se encontró diferencia significativas $p < 0.05$, siendo la segunda poda la que mayor aporte de biomasa dio al sistema, en especial por *E. poeppigiana* bajo los diferentes manejos (Figura 1), *T. amazonia* al contrario disminuye su aporte de biomasa en relación a la primera poda (Figura 1), esta diferencia puede atribuirse a la variación de la intensidad de poda de los árboles en las dos ocasiones. Lo anterior buscando dar formación a los árboles y mejorar el micro clima para el café.

En cuanto a la diferencia en la cantidad de biomasa entre las diferentes especies de sombras, puede atribuirse a que *E. poeppigiana* es un género de rápido crecimiento, alta producción de biomasa y habilidad para soportar podas regulares con brotes posteriores vigorosos (Ramírez 1990; Russo y Bowski 1986). Por otra parte (Chesney *et al.* 2001) manifiesta que los árboles de *E. poeppigiana* con poda parcial conserva más raíces finas que una poda completa, y que la retención de una rama es suficiente para asegurar la recuperación rápida del área foliar.

Al considerar el aporte anual de biomasa al sistema de las dos podas, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.0001$), siendo los mayores aportes de biomasa por MCE y MOE (11,790.02 y 10,072.22 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente). Investigación realizada por Arana (2003), en dos localidades determinó que *E. poeppigiana* en sistema de café orgánico aporta 17,286 y 18,368 kg ha⁻¹ poda⁻¹ de materia seca, en Paraíso de Cartago y en CATIE, Turrialba respectivamente. En el caso de Paraíso esta plantación tiene 35 años de establecida y 11 años de su reconversión a café orgánico, con densidades de 500 árboles ha⁻¹; en CATIE se estableció hace 11 años y tiene 7 años en café orgánico, con densidades de 400 árboles ha⁻¹. Estos resultados difieren a lo encontrado en esta investigación con densidades de árboles muy similares (417 árboles ha⁻¹) establecidas en el 2000, posiblemente esta diferencia marcada se deba a las edades de la plantación. Russo y Budowski (1986) reportaron una producción de 11,800 kg ha⁻¹ año⁻¹, de biomasa aérea de *E. poeppigiana* a través de dos podas como parte del manejo brindado a la plantación, estos resultados son similares a lo encontrado en el presente estudio con densidades más bajas, de 280 árboles ha⁻¹.

Cuadro 4. Cantidad (kg) de biomasa vegetal (peso seco) aportadas por la poda de *E. poeppigiana*, *A. idiopoda*, *T. amazonia*, bajo sistemas de manejo orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Poda 1 Medias kg ha ⁻¹	Poda 2 Medias kg ha ⁻¹	Aporte Total kg ha ⁻¹ año ⁻¹
MC T	824.74 b ¹	445.63 a	1270.37 a
MO T	709.25 b	550.44 a	1295.69 a
MC A	2033.31 b c	1315.08 a	3348.39 a
MO A	1348.27 b c	1428.09 a	2776.36 a
AC T	2023.09 b c	1430.17 a	3453.26 a
AC E	177.46 a	2229.82 a	2407.28 a
MO E	2697.39 c	7374.83 b	10072.22 b
MC E	3396.92 c	8393.10 b	11790.02 b
p-valor	0.0036	0.0001	0.0001

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (Prueba LSD Fisher p<0.05). ¹Letras indican diferencias de medias para la variable transformada.

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

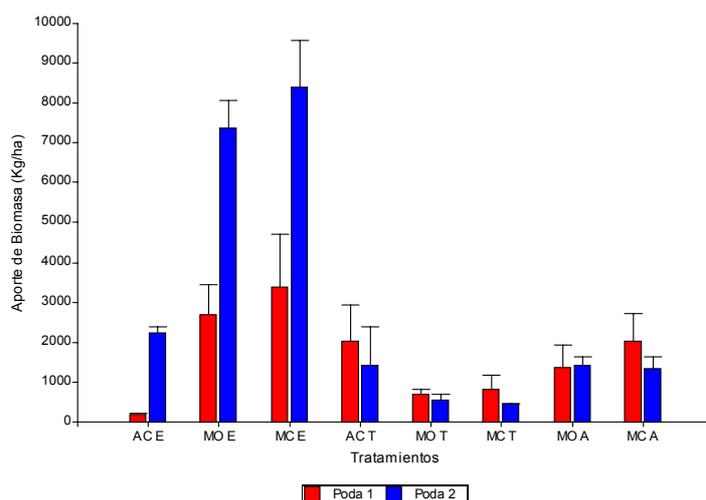


Figura 1. Aporte de biomasa (kg ha⁻¹) por tratamientos en diferentes épocas de podas (poda 1: época seca, poda 2: época lluviosa) en sistemas agroforestales de café, Turrialba, Costa Rica

2.4.2 Aporte de nutrientes

2.4.2.1 Contenido porcentual de nutrientes en hoja

Todos los valores de los contenidos de nutrientes (N, P, K, Mg, Ca) presentan diferencias significativas entre tratamientos tanto en la poda uno como en la poda dos (Cuadro 5 y Cuadro 6). En la poda dos se observó un ligero aumento en los contenidos nutricionales con respecto a la poda uno. Hay diferencia entre los contenidos de nutrientes por árbol de sombra y sistema de manejo. En la poda uno y dos la tendencia de nutrientes fue: N>Ca>K>Mg>P.

Cuadro 5. Contenido porcentual de nutrientes en hoja (poda 1 época seca) de *E. poeppigiana*, *A. idiopoda*, *T. amazonia*, en diferentes sistemas de manejo (Orgánico y Convencional de café, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	% N	% Ca	% K	% Mg	% P
ACE	4.39 b	1.84 b	1.89 b	0.40 c	0.31 b
MOE	4.43 b	1.51 b	1.86 b	0.26 b	0.30 b
MCE	5.03 c	1.24 a b	1.83 b	0.26 b	0.34 b
ACT	2.01 a	1.32 a b	0.84 a	0.18 a b	0.13 a
MOT	1.75 a	1.50 b	0.81 a	0.16 a	0.17 a
MCT	1.69 a	1.57 b	0.77 a	0.16 a	0.13 a
MOA	4.58 b c	0.77 a	0.67 a	0.17 a b	0.13 a
MCA	4.55 b c	0.68 a	0.56 a	0.12 a	0.12 a
p-valor	0.0001	0.0293	0.0011	0.0003	0.0001

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (Prueba LSD Fisher $p < 0.05$). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

Cuadro 6. Contenido porcentual de nutrientes en hoja (Poda 2 época lluviosa) de *E. poeppigiana*, *A. idiopoda*, *T. amazonia*, en diferentes sistemas de manejo (orgánico y convencional), en sistema agroforestal con café, Turrialba, Costa Rica

Tratamiento	% N	% Ca	% K	% Mg	% P
ACE	4.78 b	1.19 a	2.01 b	0.31 c	0.33 d
MOE	4.84 b	1.22 a	2.15 b	0.25 b	0.34 d
MCE	4.78 b	1.35 a	1.86 b	0.26 b c	0.32 d
ACT	2.12 a	1.81 b	0.93 a	0.23 a b	0.15 a b
MOT	1.85 a	1.77 b	0.89 a	0.19 a	0.15 a b
MCT	1.91 a	2.01 b	0.90 a	0.19 a	0.14 a
MOA	4.80 b	1.11 a	0.94 a	0.28 b c	0.20 c
MCA	4.74 b	1.25 a	0.92 a	0.26 b c	0.18 b c
p-valor	0.0001	0.0001	0.0001	0.0022	0.0001

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (Prueba LSD Fisher $p < 0.05$). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

Los porcentajes de nitrógeno en la poda uno son mayores en el tratamiento con Abarema y el MCE (Cuadro 5). Mientras que en la poda dos los tratamientos con *Erythrina* y *Abarema* son los que poseen el mayor porcentaje (Cuadro 6). Se observa una mayor tendencia porcentual de nitrógeno en la segunda poda para las mayorías de los tratamientos en comparación a la primera. Valores menores a lo encontrado en esta investigación reporta Osorio (2004) al evaluar la concentración de nitrógeno en hojas verde de especies leguminosas, de *Erythrina poeppigiana* 3.88% y *Inga edulis* 3.75% de N y Gutiérrez (2003) encontró valores menores en *T. amazonia* 1.73% N. Estas diferencias pueden estar asociadas a las edades de la plantación.

Respecto al calcio se encontraron diferencias entre los tratamientos para la poda uno ($p=0.0293$) y para la poda 2 ($p=0.0001$). El contenido porcentual de calcio fue superior en la poda dos, para todos los tratamientos excepto ACE y MOE (Cuadro 6). Los que presentaron menor contenido de

calcio en la poda uno fueron: MCA, MOA, ACT, MCE. En la poda dos los mayores porcentajes de calcio se encontraron en los tratamientos con *Terminalia*.

El potasio, tanto en la poda uno como en la poda dos los tratamientos con *Erythrina* poseen los mayores porcentajes, encontrándose un relativo incremento del porcentaje de potasio en la segunda poda respecto a la primera poda (Cuadro 5 y Cuadro 6).

En cuanto al porcentaje de magnesio el valor más alto en la poda uno se encuentra en el tratamiento ACE, mientras que *Terminalia* y *Abarema*, son las que menos porcentajes tienen (Cuadro 5). En la poda dos el porcentaje del magnesio más alto también está en tratamiento ACE y los porcentajes más bajos se presentan en *Terminalia*. Al igual que el calcio el porcentaje de magnesio aumenta en la segunda poda excepto para ACE y MOE (Cuadro 6).

Los tratamientos con *Erythrina* poseen el mayor porcentaje de fósforo tanto en la poda uno como en la poda dos. No existe una tendencia general a tener mayores porcentajes de fósforo entre una poda y la otra.

2.4.2.2 Aporte total de nutrientes

Se evaluó, el aporte de nutrientes (kg ha^{-1}) de nitrógeno, calcio, potasio, magnesio, fósforo, para cada sistema por poda. Para la época seca (1era poda) el nitrógeno mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0191$), siendo los mayores aportes por MCE, MOE igual comportamiento mostraron el K ($p=0.0049$), Mg ($p=0.0471$), P ($p=0.0052$) en los sistemas de manejo MCE y MOE (Cuadro 7).

La variable aporte de calcio (kg ha^{-1}), fue transformada con Ln para lograr la correcta adecuación del modelo y reducir la variabilidad existente. El aporte de calcio en los distintos sistemas mostró diferencias significativas ($p=0.0184$), siendo los tratamientos MCE, MOE, ACT, MCA, MOT, MCT, los que mayormente aportan este nutriente (Cuadro 7). Se observa que en el manejo convencional las tres especies predominan en el aporte de calcio, excepto el ACE que resultó ser el más bajo de todos los tratamientos, mientras que con manejo orgánico sólo predomina *E.poepigiana* y *T. amazonia*. Aparentemente hay una mayor respuesta de la especie no leguminosa indistintamente del manejo en el aporte de calcio en los sistemas.

De igual forma, se evaluó el aporte de nutrientes por tratamiento en la época lluviosa (2da poda), encontrándose diferencias ($p=0.0001$) en todas las variables evaluadas. Se registraron los mayores aportes de nutrientes (kg ha^{-1}) de los tratamiento MCE, MOE, bajo el siguiente orden: N> K> Ca> P> Mg (Cuadro 7).

Al evaluar, el aporte total de nutrientes al sistema en el año (Cuadro 9), procedente de las podas, se encontraron diferencias significativas ($p<0.05$), los tratamientos que mayormente

aportaron nutrientes al sistema fueron MCE, MOE respectivamente (Cuadro 8). La tendencia de los nutrientes fue (N> K>Ca>P>Mg), lo que se mantuvo en *E. poeppigiana* con diferentes insumos (Alto convencional, Medio convencional, Medio orgánico). No obstante los otros tratamientos (árboles de sombra y manejo) no difirieron entre sí en cuanto al aporte de nutrientes al sistema (Cuadro 9).

Cuadro 7. Aporte de nutrientes (kg ha^{-1}) de los diferentes árboles de sombra y época en sistemas agroforestales de café, Turrialba, Costa Rica 2004.

Tratamiento	Primera poda kg ha^{-1} de nutrientes					Segunda poda kg ha^{-1} de nutrientes				
	N	K	Ca	P	Mg	N	K	Ca	P	N
MCT	14.4 a	6.7 a	12.9abc ¹	1.1 a	1.2 ab	6.3 a	3.7 a	7.9 a	0.6 a	0.8 a
MOT	12.4 a	5.6 a	10.8abc	1.1 a	1.1 a	6.5 a	4.5 a	8.1 a	0.8 a	0.8 a
MCA	90.9 abc	12.6 a	13.8 bc	2.6 ab	2.4 ab	35.2 ab	11.0 a	11.7 a	2.1 a	1.7 a
MOA	62.2 a	9.5 a	10.0ab	1.9 a	2.3 ab	37.8 ab	13.1 a	12.0 a	2.8 a	1.7 a
ACT	40.1 ab	16.2 a	24.6 bc	2.4 ab	4.0 abc	17.7 a	10.3 a	17.3 a	1.6 a	2.6 ab
ACE	7.6 a	3.0 a	3.7 a	0.5 a	0.8 a	67.3 b	43.1 a	18.0 a	1.6 a	5.0 b
MOE	116.8 bc	50.5 b	41.3 c	7.8 bc	6.9 bc	183.3 c	135.8 b	55.6	17.6 b	11.9 c
MCE	168.3 c	58.4 b	46.3 c	11.2 c	8.9 c	191.7 c	146.8 b	68.9	18.5 b	14.5 c
p-valor	0.0191	0.0049	0.0184	0.0052	0.0471	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (Prueba Duncan $p < 0.05$).

¹Letras indican diferencias de medias para la variable transformada. E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

Estos resultados, concuerdan con los obtenidos por Chesney *et al.* (2001) lo cual indica que hay una correlación directa entre la biomasa y el aporte de nutrientes reciclado al sistema. De igual forma Arana (2003) encontró en CATIE, niveles superiores de biomasa y nitrógeno ($18.368 \text{ kg ha}^{-1}$ poda⁻¹ y $256 \text{ kg de N ha}^{-1}$ respectivamente), siendo diferente, al contenido de biomasa y nitrógeno encontrado en esta investigación ($5895.01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $180.0 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente), esta diferencia puede deberse a la edad de la plantación. Los resultados indican que la especie de sombra de *E. poeppigiana* fue la que mayor aporte de nutrientes dio al sistema, en especial el nitrógeno, la otra especie que mayor aportó nitrógeno al sistema fue *A. idiopoda* esta diferencia con *T. amazonia* posiblemente se deba a que son especies leguminosas fijadora de nitrógeno. Esto enfatiza la importancia de los árboles de sombra leguminosos en la dinámica del N para los sistemas de manejo de café sostenibles. Además que esta especie tiene la particularidad de fijar nitrógeno atmosférico en sus hojas y que esta fijación esta influenciada por el tipo de poda y la fertilización (Arana 2003). Por otro lado Alpizar *et al.* (1983) manifiestan resultados superiores en *E. poeppigiana* y *C. alliodora* (biomasa y nutrientes) a lo encontrado en este ensayo con *E. poeppigiana* y *T. amazonia* (Cuadro 4 y Cuadro 7). Siendo el aporte de biomasa (hojas y ramas) en *E. poeppigiana* de $12,417 \text{ kg ha}^{-1}$ y nutrientes $286.19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, $183.87 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$, $122.03 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Ca}$, $42.80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Mg}$, y $24.35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ respectivamente, o sea (N>K>Ca>Mg>P) esto es producto de dos podas totales con densidades de $500 \text{ árboles ha}^{-1}$. El aporte de biomasa de *C. alliodora* es de $5553.51 \text{ kg ha}^{-1}$ esta proviene del sistema pasto con laurel a densidades de $463 \text{ árboles ha}^{-1}$, el aporte de nutrientes es $92 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, $88.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$, $53.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Ca}$,

26.8 kg ha⁻¹ Mg, 11.4 kg ha⁻¹ P. Es posible que esta diferencia marcada se deba a las fuertes fertilizaciones de abono completo realizadas 4 veces año⁻¹ en estos sistemas que favorecen la adsorción de nutrientes.

Cuadro 8. Tendencia del aporte de nutrientes por poda en manejo orgánico y convencional en sistemas agroforestales con café, Turrialba, Costa Rica.

Nutrientes	Poda en verano	Poda en invierno
N	MCE>MOE>MCA>MOA>ACT>MCT>MOT>ACE	MCE>MOE>ACE>MOA>MCA>ACT>MOT>MCT
K	MCE>MOE>ACT>MCA>MOA>MCT>MOT>ACE	MCE>MOE>ACE>MOA>MCA>ACT>MOT>MCT
Ca	MCE>MOE>ACT>MCA>MCT>MOT>MOA>ACE	MCE>MOE>ACE>ACT>MOA>MCA>MOT>MCT
P	MCE>MOE>MCA>ACT>MOA>MOT>MCT>ACE	MCE>MOE>ACE>MOA>MCA>ACT>MOT>MCT
Mg	MCE>MOE>ACT>MCA>MOA>MCT>MOT>ACE	MCE>MOE>ACE>ACT>MOA>MCA>MOT>MCT

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

Es importante señalar que en la poda de verano los sistemas que mostraron tener mayor aporte de nutrientes fueron MCE, MOE, seguido de ACT que aporta K, Ca, Mg, mientras que MCA aporta N y P. Los MCT y MOT aportan relativamente pocos nutrientes al sistema, este mismo comportamiento lo refleja MOA y en última instancia lo hace el ACE.

Cuadro 9. Aporte de nutrientes (kg ha⁻¹ año⁻¹) por árbol de sombra (*Erythrina poeppigiana*, *Abarema idiopoda*, *Terminalia amazonia*) en sistemas agroforestales de café, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	Poda total kg ha ⁻¹ de nutrientes				
	N	K	Ca	P	Mg
MCT	20.7 a	10.4 a	20.8 a	1.7 a	2.0 a
MOT	18.9 a	10.1 a	18.9 a	1.9 a	1.9 a
ACT	57.8 a	26.5 a	41.9 a	4.0 a	6.6 a
MCA	126.1 a	23.6 a	25.5 a	4.7 a	4.1 a
MOA	100.0 a	22.6 a	22.0 a	4.7 a	4.0 a
ACE	74.9 a	46.1 a	21.7 a	6.1 a	5.8 a
MOE	300.1 b	186.3 b	96.9 b	25.4 b	18.8 b
MCE	360.0 b	205.2 b	115.2 b	29.7 b	23.4 b
p-valor	0.0001	0.0001	0.0037	0.0001	0.0001

Significancia al nivel del 5% prueba de Duncan (p<0.05), ns: no significativo (p>0.05). Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (p<0.05). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

En época de invierno la especie de *Erythrina* con manejo medio convencional (MCE) y medio orgánico (MOE), se diferencia de los otros tratamientos y aportan mayormente nutrientes al sistema. Es importante destacar que el ACE cambia su comportamiento en el aporte de nutrientes donde estaba ubicado de último en la poda anterior pasa a ocupar el tercer nivel de importancia, posiblemente se debe a que en esta poda no se realizó la práctica cultural de manejo previo a la poda. Los MOA aportan

N,K,P, al igual que ACT que aportan Ca, Mg. Mientras que los MCA y MOT aportan relativamente pocos nutrientes al sistema y en el último nivel se encuentra MCT como el tratamiento que aporta muy pocos nutrientes al sistema (Cuadro 8).

2.5. Conclusiones

1. De las tres especies de árboles de sombra evaluadas, *Erythrina* consistentemente mostró un mayor aporte de biomasa que *Terminalia* y *Abarema*, en las dos épocas de poda.
2. La producción de biomasa de *Erythrina* mostró un efecto marcado del sistema de manejo, siendo el MC y MO estadísticamente superior al AC. Produciendo este cerca del 76% y 80 % menos que los tratamientos orgánico y medio convencional.
3. En el sistema con *Terminalia* bajo diferentes manejos se observó que la primera poda aportó mayor biomasa que la segunda en especial para el tratamiento ACT.
4. *Abarema* no mostró una respuesta estadísticamente significativa en la producción de biomasa como resultado del sistema de manejo, en ninguna de las podas.
5. Los sistemas MOE y MCE aportan de 300 a 360 kg N ha⁻¹ año⁻¹, así como también 180 a 200 kg K ha⁻¹ año⁻¹, lo que es estadísticamente superior a los demás manejos y tipos de sombra.
6. *Terminalia* AC, mostró un mayor aporte de nutrientes al sistema, que TMC y TMO.

2.6. Recomendaciones

1. Para futuros estudios se debe evaluar el comportamiento de *Erythrina* en poblaciones mixtas con *Terminalia* y *Abarema*, para ver la tendencia de su comportamiento en cuanto al balance de biomasa y nutriente, de manera que se pueda obtener información para diseñar estrategias de manejos que favorezcan los ciclajes de nutrientes y la conservación en el sitio.
2. Los aportes de nutrientes en la biomasa de *Erythrina* vía manejo regulado de la poda aérea deben ser considerados en los programas de fertilización de los diferentes sistemas de manejo.
3. Se debe realizar este ensayo en un periodo mayor de establecimiento por que puede ser que estos sistemas estén aún en un periodo de transición.

2.7. Literatura citada

- Aguilar, A.; Beer, J.; Vaast, P.; Jiménez, F.; Staver C.; Kleinn, C. 2001. Desarrollo del café asociado con *Eucalyptus deglupta* o *Terminalia ivorensis* en la etapa de establecimiento. *Agroforestería en las América* 8 (30): 28-31.
- Alpizar, L.; Fassbender, H W.; Heuvel, J. 1983. Estudio de sistemas agroforestales en el experimento Central del CATIE, Turrialba, 1. Determinación de biomasa y acumulación de reservas nutritivas (N, P, K, Ca, Mg). Turrialba, Costa Rica. 28p.
- Altieri, M.A. 1999. Diseñando agroecosistemas sustentables. In Altieri, M.A (ed). *Agroecología: Bases científica para una agricultura sustentable*. Montevideo, UY. Nordan-Comunidad. p. 87-101.
- _____; Nicholls C.I. 2002. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de Plaga y Agroecología* n° 64:17-24.
- Arana M, V H. 2003. Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*Coffea arabica* L.) asociado con poró (*Erythrina poeppigiana* (walpers) o.f Cook). Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 100 p.
- Beer, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems* 7:103-114.
- _____; Harvey, C.; Ibrahim, M.; Harmand, J.M.; Somarriba, E.; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10 (37-38): 80-87.
- Benzing, A. 2001. *Agricultura orgánica: Fundamento para la región andina*. Villingen- Schwenningen. DE. Editorial Neckar-Verlag. 682 p.
- Berninger, F.; Salas, E. 2003. Biomass dynamics of *Erythrina lanceolata* as influenced by shoot-pruning intensity in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 57: 19-28.
- CATIE. Laboratorio de análisis de suelo y tejido vegetal y agua. 1990. Análisis de nitrógeno en suelos: Método Semimicro Kjeldahl. Turrialba, Costa Rica. 3 p.
- _____. Laboratorio de análisis de suelo y tejido vegetal y agua. 1990. Procedimiento de Digestión de la muestra de tejido vegetal para determinación de cobre, zinc, manganeso, hierro, calcio, magnesio, potasio, fósforo y azufre. Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- _____. 2000. Manejo de semillas de 100 especies forestal de América Latina. Vol.1. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica, Manual Técnico N° 41, 204 p.
- Chávez, A, Víctor.; Molina, E. 2002. Extracción anual de nutrientes por los cultivos Costa Rica 95 y CATUAÍ. In IICA. Boletín Promecafé n° 94. 23p.

- Chesney, PE.; Schlönvoigt, A.; Kass, D. 2000. Producción de tomate con soporte vivos en Turrialba, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 7(26): 57-60.
- _____.; Schlönvoigt, A; Kass, D; Vlek, P; Murach, D. 2001. Respuesta de las raíces finas y acumulación de nitrógeno en el follaje de *Erythrina poeppigiana* después de podas parciales o completas. *Agroforestería en las Américas*. 8(30): 48-51.
- Cody, M.; McGill, W.; Gill, D.; Alegre, J.; Kass, D.; Rothwell, R. 2000. Patrones de liberación y distribución de nitrógeno en barbechos mejorados. *Agroforestería en las Américas*. 7 (26): 65-67.
- Cordero, J; Mesén, F; Montero, M; Stewart, J; Dossier, D; Chanberlain, J; Pennington, T; Hands, M; Hughes, C; Detlefsen, G. 2003. Descripciones de especies de árboles nativos de América Central. *In* Cordero, J; Boshier, D H . (eds). *Árbol de Centro América: un Manual para Extensionistas*. Oxford, UK. FRP. OFI/CATIE. p. 311-958.
- Coyne, M. 1999. *Microbiología del Suelo: un enfoque exploratorio*. Madrid, España. Paraninfo. 416p.
- Di Stéfano, J.F.; Fournier, L.A. 1998. Biomasa aérea, concentración de nutrientes y daños en árboles de *Vochysia guatemalensis*, en un monocultivo de cuatro años, Tabarcia, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 22 (2): 235-241.
- Duguma B.; Kang B. T.; Okali D.U.U. 1988. Effect of pruning intensities of three woody leguminous species grown in alley cropping with maize and cowpea on an alfisol. *Agrofor Sys* 6: 19-35.
- Farell, J. 1990. The influence of trees in selected agroecosystems in Mexico. *In* S.R. Gliessman (ed), *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. New York, US. Springer-Verlag. p. 169-183.
- _____.; Altieri, M.A. 1999. Sistemas agroforestales. *In* Altieri, MA (ed) *Agroecología: Bases científica para una agricultura sustentable*. Montevideo, UY. Editorial Nordan-Comunidad. p. 229-243.
- Fassbender, HW. 1993. *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*. 2ed. Turrialba, Costa Rica, CATIE/GTZ. 491p.
- Fichersworing H, B.; RoBKamp R, R. 2001. *Guía para la Caficultura Ecológica*. 3ed. Lima, PE. Editorial López. 153p.
- Fournier, LA. 1988. El cultivo de cafeto (*Coffea arabica* L) al sol o la sombra: Un enfoque agronómico y ecofisiológico. *Agronomía Costarricense* 12 (1): 131-146.
- Galloway, G; Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. Turrialba, Costa Rica, CATIE. (Serie Técnica. Informe Técnico N° 285) 163 p.

- Gliessman, S R. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, CR, CATIE. 359p.
- Guharay.F.; Monterroso, D.; Staver, C. 2001. El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América Central. *Agroforestería en las Américas*. 8(29): 22-29.
- Gutiérrez, P.S.; Vaast, P.2002. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucaliptos deglupta*, *Terminalia ivorensis* o sin sombra. *Agroforestería en las Américas*. 9 (35-36): 44-49.
- Haggar, J.P; Staver, C. 2001. Como determinar la cantidad de sombra que disminuya los problemas fitosanitarios de café: Como hacerlo. *Agroforestería en las Américas*. 8 (29): 42-45.
- Icafé (Instituto del café de Costa Rica). 1998. Manual de recomendaciones para el cultivo del café. San José, Costa Rica: 193p.
- Imbach, A.C.; Fassbender, H.W.; Beer, J.; Borel, R.; Bonnemann. A. 1989. Sistemas Agroforestales de Café (*Coffea arabica*) con Laurel (*Cordia alliodora*) y Café con poro (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. VI. Balance hidrológicos e ingreso con lluvias y Lixiviación de Elementos Nutritivos. Turrialba. 39(3):400-414.
- InfoStat. 2004. InfoStat, versión 2004. Manual del usuario. Grupo InfoStat,FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas, Argentina.
- Linkimer, M.; Muschler, R.; Benjamin, T.; Harvey, C. 2002. Árboles nativos para diversificar cafetales en la zona Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 9(36-35):37-43.
- McDaniel, P. 2001. Características de los Suelos del Ensayo de Sistemas con café. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2p.
- Montagnini, F.; Fernández, R.; Hamilton, H. 1995. Relación entre especies nativas y la fertilidad de los suelos, 1. Contenido de elementos en la biomasa. *Yvyrareta*. 6 (6): 5-12.
- Montagnini, F. 2000. Ciclaje de nutrientes en plantaciones con especies puras y mixtas en Región de Bosque Húmedo Tropical. *In Consejo Nacional de Rectores (6,2000, San José, Costa Rica) Taller de nutrición forestal, Memoria*. San José, Costa, Rica. FONAFIFO/UNA/INTEC. p17-24.
- _____ ; Jordan, C. 2002. Reciclaje de nutrientes. *In Ecología y conservación de Bosques Neotropicales..* Guariguata, MR; Catan,GH. eds. Cartago, Costa Rica. LUR. p.167-191.
- Muschler, R.G. 2000. Árboles en cafetales. Turrialba, Costa Rica: CATIE/GTZ. 139 p. (Materiales de enseñanza n° 5).
- Oberholzer, H.R.; Mder, P.; Fliessbach, A. 2000. DOC-trial: 20 years of organic and conventional farming affect soil microbial properties. *In Alföldi, T; Lockeretz, W; Niggli, U. (eds). The World Grows Organic (13th. 8, 2000, Zürich, Alemania). IFOAM/vdf/ IOS/FiBL. p.14.*

- _____.; Nowack, K; Mäder, P. 2000. Soil microbiological aspects in winter cereal field of organic and integrated farms. *In* Alföldi, T; Lockeretz, W; Niggli, U. (eds). *The World Grows Organic* (13th. 8, 2000, Zürich, Alemania). IFOAM/vdf/ IOS/FiBL. p.15.
- 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 MSc. Turrialba, Costa Rica. 75p.
- Payan Z, F.; John, B.; Jones, D.; Harmand, JM.; Muschler, R. 2002. Concentraciones de carbono y nitrógeno en el suelo bajo *Erythrina poeppigiana* en plantaciones orgánicas y convencionales de café. *Agroforestería en las Américas*. 9 (35-36):10-15.
- Ramírez, J. E. 1997. Fertilización de café a plena exposición solar y con sombra regulada. *In* .Simposio Latinoamericano de Caficultura (XVIII, 1997, San José, Costa Rica). Memoria. Comps. J. Echeverri; L. Zamora. San José Costa Rica. IICA/ Promecafé.p183-190.
- Ramírez, C. 1990. Algunas consideraciones sobre el asocio de árboles de poro (Género *Erythrina*) en plantaciones de café. *In* IICA. Boletín Promecafé n° 48 p 9-13.
- Rao, M. R; Fair, P.K; Ong,CK.1998. Biophysical interaction in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 38: 3-5.
- Refsnyder, W. S., Darnhofer.T.O. 1989. *Meteorology and agroforestry*. Internacional Center for Research in Agroforestry: Nairobi, Kenya.
- Russo, R.; Budowski, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomasa of *Erythrina poeppigiana* as coffee shade tree. *Agroforestry systems* (Holanda). 4(2):145-162.
- Salazar, E.; Muschler, R.; Sánchez, V.; Jiménez. F. 2000. Calidad de *Coffea arabica* bajo sombra de *Erythrina poeppigiana* a diferentes elevaciones en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 7(26.): 40-42.
- Samper K,M. 1999. Trayectoria y Viabilidad de las Caficulturas Centroamericanas. *In* Bertrand, B; Rapidez,B. Eds. *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. San José, C.R.: IICA: PROMECAFE: CIRAD: IRD: CCCR.FRANCIA. Editorial Agroamérica. p1-68.
- Sánchez, J F.; Moreno, R A.; Muñoz, F. 1993. *Erythrina fusca*: un árbol leguminosa de la costa norte de Colombia con potencial agroforestal. *In* Westley, S B; Powell, M H (eds) *Erythrina in the New and old worlds*. Hawaii, US. NFTA p 55-61.
- Shepherd, D.;Montagnini, F. 1999. Acumulación de carbono en plantaciones mixta y pura en el Trópico húmedo. *In* *Semana Científica CATIE* (4,1999. Turrialba, Costa Rica). Logros de la investigación para el nuevo milenio; Acta. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p 345-349 (serie técnica n°5).

- Somarriba, E. 1998. Que es agroforestería. *In* Jiménez, F; Vargas, A. (eds). Apuntes de clase del curso corto: Sistemas Agroforestales. Turrialba, CR, CATIE/GTZ. p. 3-14.
- Soto-Pinto, L.; Kass, D.L.; Szott, L., Ferreira, P. 1993. Dinámica de la eficiencia de uso y balance de nutrimentos en sistemas agroforestales y cultivos con enmiendas orgánicas en la montaña, Turrialba, Costa Rica. *In* Semana Científica CATIE (1993, Turrialba, Costa Rica) Programa Agricultura Tropical Sostenible. Memoria. Salazar, R. (ed). Turrialba, Costa Rica. CATIE. p33-34.
- Tavares, F.; Beer, J.; Jiménez, F.; Schoroth, 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.
- Vaast, P. 1999. El mejoramiento de los sistemas agroforestales: Convenio CATIE-CIRAD. *Agroforestería en las Américas*. 6(23) 76.
- Vaast, P; Snoeck, D. 1999. Hacia un manejo sostenible de la materia orgánica y de la fertilidad biológica de los suelos cafetaleros. *In* Bertrand, B; Rapidez, B. eds. Desafío de la caficultura en Centro América. San José, C.R. IICA: PROMECAFE: CIRAD: IRD: CCCR. Francia. Editorial Agronómica. p139-169.
- Yépez, C.; Muschler, R.; Benjamín, T.; Musálem, M. 2002. Selección de especies para sombra en cafetales diversificados de Chiapas, México. *Agroforestería en las Américas*. 9(35-36): 55-61.
- Young, A. 1999. *Agroforestry for soil management*. 2ed. Wallingford, UK. CAB International – ICRAF. 276 p.

3. ARTÍCULO 2

Liberación de nutrientes en residuos de poda y abono orgánico (broza de café) bajo la influencia de tres especies de sombra *E.poepigiana*, *T.amazonia*, *A. idiopoda* y sistema de manejo convencional y orgánico en sistemas agroforestales de café

3.1. Introducción

Los sistemas de producción agrícola se han visto afectados por el manejo que el ser humano introduce ya sea por razones económicas o sociales, ambientales, causando un efecto directo sobre la sostenibilidad del mismo (Bertsch 1995, Martínez 2004). Tal es el caso de los sistemas convencionales donde se cultiva café sin sombra, con altas densidades de cultivares de porte bajo, con poca protección del suelo, baja restitución de materia orgánica y por ende bajo ciclaje de nutrientes lo cual conlleva a depender de insumos externos (Vaast y Snoeck 1999).

Muschler (2000) manifiesta que los sistemas agroforestales juegan un papel ecológico importante en la estabilidad del sistema, al reducir ciertos insumos (fertilizantes, herbicidas). Hernández y Ibarra (1997) sugieren que el cultivo de café se establezca bajo sombra para garantizar la sostenibilidad de la caficultura a largo plazo debido a que los árboles asociados con café pueden ayudar a mantener tanto la productividad y la calidad de producción. A la vez que permite una captura más eficiente de la energía solar, favoreciendo la absorción y el ciclaje de nutrientes (Gliessman 2002).

Por eso es muy importante elegir especies de árboles que se adapten a las condiciones locales ya que se contribuye a que los nutrientes sean devueltos a la superficie del suelo a través de la hojarasca, residuos de poda, raíces muertas o por la biomasa microbial (Montagnini y Jordan 2002).

En los sistemas agroforestales el asocio de los árboles especialmente con leguminosas fijadoras de nitrógeno y el uso de abonos orgánicos (estiércol y compost) pueden contribuir en gran parte a la demanda de nutrientes del café, en forma más eficiente debido a que la liberación de nutrientes se realiza de forma paulatina, existiendo un máximo aprovechamiento por parte del cultivo a la vez que se reduce la pérdida por lixiviación y volatilización (Vaast y Snoeck 1999; Cody *et al.* 2000).

Los factores que regulan la descomposición y liberación de nutrientes de los residuos orgánicos y materia orgánica del suelo incluyen al clima (temperatura y humedad), textura del suelo, la cantidad y composición química del material, la relación C:N y contenidos de polifenoles y lignina (Szott y Kass 1994) y la actividad biológica del suelo especialmente bacterias hongos y actinos (Vaast

y Snoeck 1999). Estos últimos juegan un papel importante en la velocidad de descomposición de los residuos (Fassbender 1993).

Zuluaga (2004) al comparar sistemas de manejo de café encontró que el manejo orgánico con *Erythrina* presentó un mayor contenido de carbono en la fracción macro-orgánica del suelo que en el manejo convencional de *Erythrina* y plena exposición solar atribuyendo este comportamiento posiblemente a la adición de residuo vegetales y abono orgánicos, mientras que para el N observó mayor movilidad en el suelo con sistemas de manejo medio orgánico y medio convencional de *Erythrina*, en relación al sistema sin árbol.

El objetivo de la presente investigación se basó en evaluar la tasa de descomposición y liberación de nutrientes de residuo de poda de tres especies de sombra *E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda* y broza de café en época seca en un sistema de café orgánico y convencional en la zona de Turrialba, Costa Rica.

3.2. Revisión de literatura

3.2.1 Composición de los residuos

La producción y descomposición de residuos vegetales es un eslabón que une los factores bióticos (planta) y abióticos (capa de mantillo y suelo mineral) de los sistemas agroforestales (Fassbender 1993).

Este mismo autor menciona que los componentes orgánicos de los restos animales y vegetales se diferencian en los siguientes grupos:

1. Carbohidratos: constituyen los tejidos de sostén y conducción de las plantas y representan sustancias de reserva, dentro de ellos se encuentran:
 - a) Monosacáridos y derivados: glucosa, galactosa, ribosa, arabinosa, xilosa y aminoazúcares (glucosalina).
 - b) Oligosacáridos: disacáridos como maltosa, sacarosa, lactosa y trisacáridos como rafinosa.
 - c) Polisacáridos: almidón, hemicelulosa, pectina, inulina, glucógeno y quitina.
2. Ligninas: son polímeros derivados del fenilpropano sustituido.
3. Proteína, polipéptidos y ácidos nucleicos: son polímeros constituidos con base en aminoácidos y oligopéptidos.
4. Grasas, ceras y resinas: las grasas naturales se derivan de la glicerina esterificada con ácidos grasos, son sustancias de reserva que se acumulan en diferentes órganos de la plantas, especialmente en la semilla. Las ceras son ésteres de ácidos grasos y alcoholes que forman la cutícula del tallo, las hojas y los frutos, cumpliendo la función de protección.

5. Otros compuestos: los ácidos orgánicos, pigmentos, alcaloides, hormonas externas, antibióticos, quelatos son compuestos bioquímicos importantes en el tejido vegetal, pero de poca importancia para la mineralización y humificación de los restos vegetales.

3.2.2 Factores involucrados en los procesos de descomposición de leguminosas

Se conoce que cada planta absorbe nutrientes de acuerdo a su exigencia y que esta asimilación puede ser favorecida o afectada por las condiciones de su entorno (climáticos y edáficos), tal es el caso de la mayoría de las leguminosas que pueden ser más ricas en almidón, proteína y calcio, mientras que las gramíneas son más ricas en celulosa y lignina (Fassbender 1993).

Primavesi (1984) manifiesta que las concentraciones de ligninas en hojas son de 5.5 a 9% y en la raíz supera hasta un 20% caso de las gramíneas, causando diferencias en la velocidad de descomposición entre estos dos órganos vegetales.

La concentración de los distintos compuestos en hoja de leguminosa son alrededor de 21% de proteína, 15% en celulosa, 8% de hemicelulosa y 5% de lignina, mientras que para la raíz de leguminosa sus valores son de 22% de celulosa 13% de proteína, 11% de hemicelulosa y 8% de lignina. Estos compuestos tienden a descomponerse bajo el siguiente orden: primero los almidones y proteínas, seguido de la celulosa y lignina que tiende a descomponerse más lentamente debido a su estructura química (Primavesi 1984).

Los elementos nutritivos se acumulan en las plantas como compuestos estos forman estructura polimerizada como carbohidratos proteína, grasa o como compuestos inorgánicos de una estructura más simple que varía según la edad y el órgano vegetal analizado. Los tejidos verdes son más ricos en carbohidratos y proteínas mientras que los tejidos leñosos presentan compuestos fenólicos (lignina) y celulosas (Fassbender 1993).

3.2.3 Descomposición del material vegetal y liberación de nutrientes

3.2.3.1 Metodología para evaluar la descomposición de hojarasca en sistema agroforestales

Se han utilizado diversas metodologías para determinar las tasas de descomposición de hojarasca dependiendo del material de interés y las condiciones ambientales. Los dos métodos más utilizados son: bolsa de descomposición (*litterbags*) y cubo de descomposición (*litterbaskets*) son métodos donde se confinan la hojarasca para ser evaluadas y donde se deja libre con el propósito de evaluarlas en su estado natural, esto debido a su fácil manejo, fácilmente replicable y capaz de excluir a ciertas faunas del suelo (Vanlauwe *et al.* 1997; Schroth 2003).

El tamaño de las bolsas y la apertura es un factor importante en el proceso de descomposición de la hojarasca. Si el tamaño es muy pequeño la hojarasca queda comprimida y retarda el proceso de descomposición. Las mallas más utilizadas son con apertura de 1mm en la parte de abajo y de 4 a 5 mm en la parte de arriba para facilitar la penetración de la fauna del suelo (Melillo *et al.* 1982; Jaimez y Franco 1999).

Como parte de la descomposición es realizada por microorganismos estos tienen exigencias muy específicas para su nutrición, por lo que es lógico pensar que cada tipo de vegetación tenga su tipo de microorganismo que la descomponga (Primavesi 1984).

3.2.3.2 Factores que influyen en la descomposición de los residuos vegetal

La descomposición de residuos orgánicos (hojarasca, ramas, troncos, raíces, otros restos vegetales y animales) es el principal proceso de reciclaje de nutrientes en un ecosistema. Por tal motivo la cantidad de nutrientes liberado al suelo por la descomposición es un factor importante para la sostenibilidad del sistema. Lo que hace necesario evaluar la cantidad de nutrientes que se libera sobre todo en especies de rápido crecimiento (Montagnini y Jordan 2002).

Los factores comúnmente involucrados en el proceso de descomposición del material vegetal y liberación de nutrientes están relacionados con factores internos y externo entre los cuales se puede mencionar: relación C:N, contenido de polifenoles y lignina, perturbación o manejo del ecosistema, humedad, temperatura, pH, calidad, microorganismos, constitución genética del germoplasma, contenidos nutricionales, aireación, acidez del suelo (Fassbender 1993; Mafongoya *et al.* 1998; Cody *et al.* 2000; Hartemink y O`Sullivan 2001; Montagnini y Jordan 2002).

3.2.3.3 Descomposición del material vegetal y liberación de nutrientes en especies leguminosas y no leguminosas

Actualmente se le está dando una mayor importancia al estudio del aporte de minerales a través de la descomposición de la materia orgánica que ofrece los árboles de especies leguminosas y no leguminosas en los sistemas agroforestales. Dependiendo de la interacción que ocurra, los árboles de sombra pueden reducir la descomposición de la materia orgánica del suelo pero estos a su vez minimizan la pérdida de nutrientes por lixiviación debido a la interacción y adsorción que se produce en el sistema radicular (Mafongoya *et al.* 1998; Basavaraju y Gururaja 2000).

En esta dirección Ribeiro *et al.* (2002) evaluaron el comportamiento de descomposición y liberación de nutrientes en especie de *E. globulus* y no encontraron pérdida de peso al incrementar la concentraciones de N,P,S por aplicación de fertilizante, sin embargo encontraron que la cantidad de N,P,S liberado durante la primera etapa de descomposición dependía de su concentración inicial en la

hoja. Infiriendo que la cantidad de estos nutrientes reciclados está relacionado con la cantidad de hoja caída y de su patrón de liberación. Igual comportamiento encontraron Guo y Sims (2002) en tres especies de *Eucalyptus* atribuyendo la descomposición y liberación a factores interno como lignina, celulosa y magnesio debido a sus concentraciones iniciales.

Por otra parte Kershner y Montagnini (1998) al evaluar cuatros especies maderable en áreas degradadas encontraron que las hojas de *T. amazonia* tuvo una descomposición total (rápida) al cabo de 6 meses, mientras que las hojas de *D. panamensis*, *A. guachapele* y hojas mixtas su descomposición fue total a los 12 meses excepto *V. koschnyi* que contenía un 15% remanente de su peso original y que la diferencias encontrada en la descomposición está relacionada con los contenidos de nutrientes en la hoja.

Mientras que Bahuguna *et al.* (1990) encontraron en 12 meses de evaluación para *Shorea robusta* y *Eucalyptus camaldulensis* una descomposición en la hojarasca de 65% y 82% respectivamente y manifiestan que esta variación puede estar atribuida a los contenidos iniciales de nutrientes entre ambas especies donde *E. camaldulensis* tuvo mayor cantidad de nitrógeno, potasio y calcio. Además mayor liberación de nutrientes en especial el potasio.

En las leguminosas, especialmente *Erythrina spp*, Palm y Sánchez (1990) encontraron 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*. Mientras que Gutiérrez (2003) y Osorio (2004) encontraron mayor tasa de mineralización y liberación del nitrógeno en hoja de *I. edulis* y *E. poeppigiana* en relación a las tasas encontradas por *T. ivorensis* y *T. amazonia*.

Por otra parte, Jaimez y Franco (1999) encontraron una descomposición del 65% al cabo de 8 meses en sistema de cacao con frutales y estos aportaron al sistema 101,10,35,23,140 kg/ha de N, P, K, Mg y Ca respectivamente, cerca del 60% de estas cantidades fue aportada por la fracción foliar.

Estudios en bolsa de descomposición y liberación de nutrientes fueron evaluados por Hartemink y O'Sullivan (2001) en hojas de *Piper aduncum*, *Imperata cilíndrica* y *Gliricidia sepium* durante 24 semanas, encontrando que *Piper* y *Gliricidia* tuvieron un comportamiento muy similar al cabo de 10 semanas de evaluación, perdiendo ambas el 50% de su biomasa, mientras que *Imperata* durante 24 semana solo había perdido el 45%. Los patrones de descomposición encontrados fueron mejor explicados por la relación de Lignina + Polifenoles /Nitrógeno, la cual fue baja para *Piper* con 4.3 y alta para *Imperata* 24.7. La hojarasca de *Gliricidia* libera 79 kg N/ha, mientras que 18 kg P/ha fueron inmovilizado en hojarasca de *Imperata*. La mayor cantidad de potasio fue liberado por *Piper*.

Martins y Azevedo (1999) encontraron variación en los compuestos estructurales de las hojas durante la descomposición siendo *Castanea Sativa* la que presentó la más rápida descomposición

debido a los compuesto soluble en agua (hemicelulosa) mientras que *Pinus pinaste* contenía grasa y cera, lignina y celulosa de descomposición más lenta.

3.2.4 Importancia de la fertilización en el agroecosistema

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 América* 1987). Pero el incremento en las cantidad de fertilizante inorgánico aplicado tiene efectos visibles en el rendimiento del cultivo; Sin embargo, como la cantidad que se aplica se incrementa progresivamente, la respuesta del cultivo disminuye exponencialmente (Rubio y Figueroa 2000).

La agricultura convencional se basa en dos objetivos: la maximización de la producción y de las ganancias. Para alcanzar estos objetivos se desarrollan prácticas que no consideran las consecuencias a largo plazo ni la dinámica ecológica de los agroecosistema (Gliessman 2002). Por tanto el uso prolongado de estas prácticas convencionales implica mayor dependencia hacia los insumos externos afectando la sostenibilidad de la agricultura.

En consecuencia a este planteamiento se busca en los sistemas agroforestales especies y variedades con capacidad de hacer un uso más eficiente de los nutrientes (EUN), particularmente para ser empleada en agricultura de bajos insumos o agricultura orgánica (Montagnini y Jordan 2002).

3.2.4.1 Fertilización orgánica

El aumento de las fuentes de nutrimentos para los cultivos es una función del abonamiento (materiales orgánicos). La liberación de nutrientes y su aprovechamiento depende de la velocidad de descomposición de los materiales, la cual está controlada por la humedad, la temperatura, la textura del suelo y su mineralogía, su distribución, la cantidad agregada y la calidad de los materiales incorporados (García 2000). El empleo de abonos orgánicos permite aportar elementos nutritivos en forma orgánica al suelo, con lo que se incrementa la reserva de ellos y el nivel de fertilidad. La liberación lenta y progresiva es garantía de que elementos móviles como el nitrógeno permanezcan retenidos en el suelo, disminuyendo su lixiviación (Romero 2000).

Existe una gran diversidad de productos que pueden utilizarse como abono orgánico. Dentro de los naturales se destacan cualquier tipo de residuo agrícola (composta, abono verde), las excreciones (estiércoles) y sub productos de origen animal (sangre, harina de hueso, pescado) y los residuos urbanos (Bertsch 1995).

Cody *et al.* 2000 al incorporar la biomasa podada de *I. edulis*, *C. macrocarpum* y *C.glandulosa*, como abono verde tipo mulch al suelo encontraron que la liberación de nitrógeno estaba influenciada por la relación de lignina + polifenoles: N y manifiestan que esto podría ser utilizado para

predecir el nitrógeno mineralizable de la biomasa de especies agroforestales. Osorio (2004) encontró a nivel de laboratorio un mayor crecimiento y producción de biomasa del maíz en el tratamiento que contenía como abono verde hoja de *Erythrina poeppigiana*.

3.2.4.1.1 La broza como abono

Se considera pulpa de café al epicarpio o cubierta roja del fruto de café y a la totalidad del mesocarpio o tejido blando, hialino que rodea al endocarpio o pergamino. Los contenidos de nutrientes de la pulpa fresca varían comúnmente entre 1.47 a 3.02 de N, 0.12 a 0.53 de P₂O₅, 2.82 a 4.21% de K₂O, 0.32 a 0.81 de CaO, 0.08 a 0.42 de Mg (Bertsh 1995; Nogueira *et al.* 2000).

Uribe y Salazar (1983) en un estudio de cinco localidades encontraron que aplicando 6 kilos de broza descompuesta por planta se obtienen los mismo rendimientos (6 t/ha/año de café cereza) que con un fertilizante completo 12-6-22 50 g/planta en el primer año y 150 g del segundo año en adelante.

Alfaro (1997) evaluó diferentes dosis de fertilizante orgánicos (pulpa de café) e inorgánicos (fórmula completa) y mezcla de ambos en un sistema agroforestal de café y encontró un mayor rendimiento cuando utilizó 1000 kg/ha de fórmula completa superando en 2580 kg/ha de cereza a la dosis de 500 kg de fórmula completa. La fertilización orgánica sola no mostró diferencias estadísticas entre las dosis empleadas, pero si mostró diferencias significativas en la producción con respecto al testigo y a la utilización de 500 kg de fórmula completa. El mayor rendimiento se obtuvo con la mezcla de fórmula completa 1000 kg/ha y abono orgánico.

3.3. Materiales y Métodos

3.3.1 Localización del estudio

La presente investigación se realizó como parte de un ensayo establecido con una visión a largo plazo (20 años), para evaluar las interacciones agroecológicas en diferentes sistemas agroforestales y de manejo (orgánico y convencional) en café.

Este ensayo se realizó en un área de 9.2 hectáreas de la finca experimental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicado en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica. El sitio del ensayo está localizado en el sector Bonilla 2, con las siguientes coordenadas 9° 53' 44" latitud norte, 83° 40' 7" longitud oeste, con una elevación aproximada de 600 msnm. El clima es trópico húmedo, con temperatura media anual de 22°C, precipitación anual de 2600 mm. Los suelos se caracterizan como aluviales mixtos, Ultisol e Inceptisol, con textura entre franco y franco-arcilloso en sus primeros horizontes (McDaniels 2001).

El ensayo consiste en lotes de café caturra plantado a 2x1 m, con tres diferentes tipos de sombra: *E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda*, plantada a 6x4 m, bajos diferentes sistemas de manejo (orgánico y convencional) (Cuadro 10).

Cuadro 10. Manejo utilizado para cada nivel de insumo en el ensayo comparativo de sistemas orgánico y convencional con tres diferentes tipos de sombra.

Nivel de insumo	Fertilización	Control de maleza	Podas
Alto convencional (AC)	800 kg ha/año 18-5-15-6-2. 45 kg/ha/año NH ₄ N ₃ , foliares B,Zn.	Uso de herbicida en toda el área del tratamiento.	En poró dos podas totales por año. En Terminalia se realiza dos podas de formación por año.
Medio convencional (MC)	400 kg/ha/año 18-5-15-6-2 45 kg/ha/año NH ₄ N ₃ , Foliares: B, Zn.	Uso de herbicidas en la entre calle con control selectivo de malezas y aplicación total en hileras	En poró dos podas parciales por año. En Terminalia y Abarema se realiza dos podas de formación por año.
Medio orgánico (MO)	Broza 10 t/ha/año, 7.5 t/ha/año de Gallinaza, Roca fosfórica 200kg/ha/año, KMag 200kg/ha/año.	Manejo mecánico (Azadón, Motoguadaña). Selectivo de malezas	En poró dos podas parciales por año. En Terminalia y Abarema se realiza dos podas de formación por año.

* Programa de fertilización año 2004

3.3.2 Tratamientos y diseño experimental

Se efectuaron dos experimentos en el tiempo (17 semanas) para determinar la liberación de nutrientes. El Ensayo 1 se llevó a cabo con los residuos de poda de los árboles de sombra (*Erythrina*,

Terminalia, *Abarema*) por tratamientos y el Ensayo 2 con abono orgánico (broza), solo en los tratamientos con manejo orgánico (MOE, MOT, MOA).

El Ensayo 1 (residuo de poda), fue conducido bajo un diseño en bloques completos al azar con un arreglo factorial incompleto con ocho tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos (Cuadro 11), surgen de la combinación de los factores tipos de especies de árboles de sombras, *Erythrina poeppigiana*, *Abarema idiopoda*, *Terminalia amazonia* y el factor grado de manejo con los niveles (alto convencional, medio orgánico, medio convencional). El sistema con *A. idiopoda* no cuenta con el tratamiento alto convencional. El Ensayo 2 se realizó en un diseño de bloque al azar con tres tratamientos con manejo orgánico y tres repeticiones.

Para los Ensayos 1 y 2 las variables analizadas fueron: la descomposición y liberación del 50% de residuos vegetal y nutriente por árbol de sombra y sistema de manejo. Porcentaje de descomposición y liberación durante 17 semanas, cantidad de nutrientes liberada (kg/ha) por cada árbol y sistema de manejo, tasa de descomposición y liberación de nutrientes.

Cuadro 11. Combinación de factores para obtención de tratamientos del ensayo en café evaluado en este estudio.

Especies	Insumo	Tratamientos
Erythrina poeppigiana (E)	Alto Convencional (AC)	AC E, MO E, MC E
Terminalia amazonia (T)	Medio Orgánico (MO)	AC T, MO T, MC T
Abarema idiopoda (A)	Medio Convencional (MC)	MO A, MC A.

3.3.2.1 Residuos de poda

La poda se realizó en febrero durante la época seca. Posterior a la poda se tomaron los pesos frescos de 15 sub muestras al azar. La cantidad de material que se colocó en cada bolsa de descomposición fue equivalente a una superficie de 25x25 cm², utilizando un cuadrante de madera de 25x25 cm² tirado en forma aleatoria en el lote.

Cada semana (0,1,2,5,9,17) se recogieron tres bolsas al azar para obtener su peso seco a 65°C hasta peso constante, para determinar los contenidos de nutrientes. El contenido de nutrientes en los residuos de la poda por semana de muestreo fueron determinados por el laboratorio del CATIE, utilizando las siguientes metodologías: Semimicro Kjeldahl para N total (CATIE 1990), el método calorimétrico del extracto de digestión nítrico-perclórica para P, y el método espectrometría de adsorción atómica para K, Ca y Mg (CATIE 1990).

3.3.2.2 Broza de café

Para determinar la tasa de liberación de nutrientes de la broza en los tres tratamientos con manejo orgánico (MOE, MOT, MOA) se colocaron 15 bolsas de descomposición, con 500 gr de broza fresca cada una. Las bolsas fueron distribuidas al azar en el campo y fueron recolectadas en diferentes semanas (1,2,5,9,17). En la semana cero se tomaron tres submuestras por pila de compost para obtener una muestra representativa y de esta manera determinar su peso seco y porcentaje de humedad inicial. Todas las muestras por semana fueron llevadas al laboratorio para obtener el peso seco a 65°C hasta peso constante. En cada muestra se determinaron los contenidos totales de N, P, K, Ca, y Mg, mediante la metodología anteriormente expuesta.

3.3.2.3 Análisis estadístico

Para determinar la descomposición y liberación porcentual de la materia seca vegetal y nutrientes por semanas procedente de los residuos de la poda de los diferentes árboles de sombra y broza, se partió de la semana cero (inicial) como el 100%, donde la descomposición y liberación está dada por la diferencia entre el 100% y el % remanente (% de materia seca y nutrientes). Para tal fin se realizó un análisis de varianza (ANOVA), y las medias (%) de cada tratamiento se compararon mediante la prueba de LSD de Fisher, con un nivel de significancia al 95% ($\alpha=0.05$), utilizando el paquete estadístico InfoStat 2004.

Los porcentajes de materia seca (residuo de poda y broza) y nutrientes (N, P, K, Mg y Ca), fueron sometidos al análisis de regresión en el tiempo al finalizar los 119 días, empleando el procedimiento de regresión (lineal, logarítmico, cuadrático, cúbico) del paquete de análisis estadístico SAS versión V8 para Windows, para determinar la curva que mejor explica el comportamiento de descomposición y liberación (materia seca y nutriente).

Para comparar la tasa de descomposición y liberación aportada en la biomasa de la poda se comparó el porcentaje de materia seca total descompuesto a los 119 días, la tasa de liberación (k) y los días requeridos para descomponer el 50% de la materia seca.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1 Tasa de descomposición de los residuos

3.4.1.1 Porcentaje de descomposición de materia seca en residuo de poda

Se evaluó la descomposición del material vegetal (residuo de poda) durante diecisiete semanas (119 días) y se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0165$). *Erythrina* es la

especie de sombra que se descompone más rápido con rango de 51% a 85% (Cuadro 132), seguido de Terminalia con rango de 45% a 54% y Abarema con rango de 38% a 42%. Los menores porcentajes de descomposición se obtuvieron con Abarema MCA (38%) y MOA (42%), mientras que los tratamientos con manejo ACE (85%) y el MCE (64%) fueron los de mayor porcentaje de descomposición (Cuadro 12). Es posible que el ACE presente el porcentaje más alto de descomposición producto del manejo (poda total) que permite una incidencia directa de las condiciones ambientales imperantes en la zona bajo estudio (sol y agua) sobre el residuo de poda expuesta en la superficie del suelo.

Se buscó la curva de mejor ajuste para describir la tasa de descomposición (k) y no se encontró un modelo que describiera adecuadamente el comportamiento de descomposición (Anexo 2) de todos los sistemas de manejo: cinco tratamientos son explicados por el modelo logarítmico (ACE, MOE, MCT, MOA, MCA) y tres por el modelo lineal (MCE, ACT, MOT), por lo que una comparación estadística no fue posible. Evaluaciones realizadas por Osorio (2004) en CICAFFE, Heredia, durante 18 semanas, encontró un modelo de ajuste logarítmico que le permitió describir la pérdida de peso en hojas de *Inga densiflora* y *Café arabica*, en sistemas agroforestales, siendo el tratamiento con hoja de *I. densiflora* la que presentó la menor pérdida de peso (35%) con una tasa de -0.12 por día, menor a la obtenida con hojarasca de café con una tasa de -0.32 por día. Sin embargo Munguía (2003) en el Cantón Pérez Zeledón durante los primeros 48 días de exposición en el campo, encontró un modelo exponencial simple para *Eucalyptus deglupta* y *Erythrina poeppigiana* con tasa de descomposición de -0.081 y -0.582 respectivamente.

El 50% (Figura 2) de la materia seca descompuesta se obtuvo en los tratamientos ACE a los 5 días, MCE a los 86 días, MOE a los 94 días, MOT a los 107 días, ACT a los 113 días. Los otros tratamientos requieren de periodos mayores de 119 días (periodo que duró el estudio) para alcanzar el 50% de descomposición.

Cuadro 12. Materia seca porcentual remanente y descompuesta de los residuos de poda durante diecisiete semanas bajo sistemas de manejo de café orgánico y convencional

Tratamiento	% Remanente	% Descompuesto
ACE	15.44 a	84.56 a
MCE	35.51 a b	64.49 a b
MOT	45.97 b c	54.03 b c
ACT	47.15 b c	52.85 b c
MOE	48.87 b c	51.13 b c
MCT	55.32 b c	44.68 b c
MOA	57.78 b c	42.22 b c
MCA	62.27 c	37.73 c
p-valor	0.0165	0.0165

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas (p<0.05)
 E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MO: Medio orgánico, MC: Medio convencional.

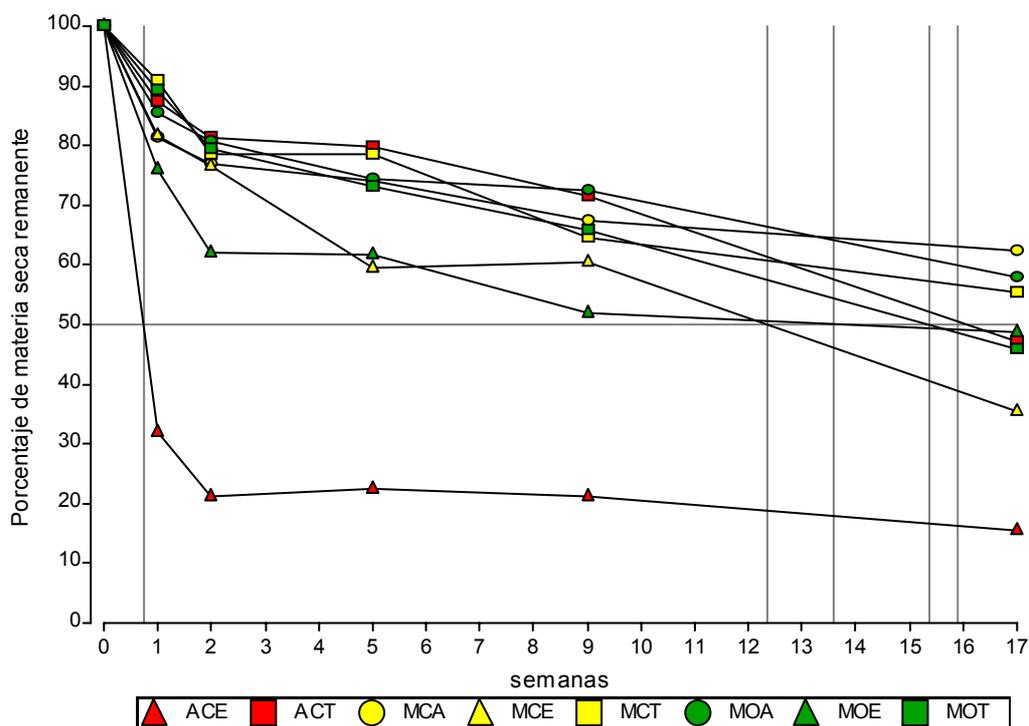


Figura 2. Porcentaje de materia seca de residuo de poda remanente en el tiempo para diferentes árboles de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*) en una comparación de sistemas agroforestales con café orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

3.4.1.1 Comportamiento general de los nutrientes

Al evaluar el porcentaje de nutrientes liberado al sistema proveniente de los residuos de poda durante diecisiete semanas (119 días), se encontró que *Erythrina* es la especie de sombra que libera más rápido los nutrientes (Cuadro 13 y Cuadro 154), en especial *Erythrina* con manejo convencional (alto y medio convencional). *Terminalia* ocupa el segundo lugar en cuanto a la velocidad de liberación de nutrientes, sobre todo con manejo alto convencional (ACT), sin embargo MOT y MCT presentan comportamientos de liberación de nutrientes muy similares (Cuadro 5). La tendencia de esta especie de sombra es: ACT>MOT≥MCT. La especie que libera más lentamente sus nutrientes al sistema es *Abarema*, sin embargo dentro de esta especie la mayor liberación se obtuvo en el manejo orgánico (MOA) seguido de medio convencional (MCA), contrario a las otras dos especies de sombra.

Al comparar la liberación general de nutrientes en todos los sistemas estudiados en el ensayo durante diecisiete semanas (119 días), se encontró que la velocidad de liberación de cada nutriente varía, lo que produjo el siguiente comportamiento: K>Mg>N≥P>Ca. Tendencias parecidas encontraron Palm y Sánchez (1990) en la liberación de nutrientes en cultivo en callejones con tres especies leguminosas: K>P>N>Mg>Ca. Este comportamiento similar de liberación de nutrientes en especial

para el nitrógeno puede deberse a que las especies evaluadas presentan altos contenidos de polifenoles que al formar compuesto más estable con el nitrógeno promueva una lenta liberación. Se buscó una curva de mejor ajuste para describir la tasa (k) de liberación para todos los nutrientes, pero no se encontró un modelo que describa adecuadamente el comportamiento de liberación, excepto el potasio que ajusta con el modelo logarítmico (Anexo 2).

Cuadro 13. Porcentaje de nutrientes liberado en residuo de poda de E. poeppigiana, T. amazonia, A. idiopoda, durante diecisiete semanas de descomposición en campo en sistemas de café orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	%N	%P	%K	%Mg	%Ca
ACE	89.02 a	88.53	99.05	90.76	68.21
MCE	80.43 a b	78.17	98.44	77.64	30.58
MOE	75.17 a b	72.25	97.50	75.28	37.01
MOA	42.87 b c d	14.04	87.29	62.63	13.22
ACT	36.20 c d	44.66	94.35	62.99	19.45
MOT	32.62 d	51.84	92.20	55.66	26.23
MCA	5.97 d	18.32	85.38	28.54	0.53
MCT	5.82 d	37.43	93.20	56.92	23.67
p-valor	0.0026	0.2165	0.2124	0.1551	0.4781

Letras distintas en la misma columna denota diferencias significativas ($p < 0.05$). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico.

Cuadro 14. Ordenamiento de los sistemas de manejo según la tasa de liberación de nutrientes del más rápido al más lento en sistema agroforestal con café, Turrialba, Costa Rica.

Nutrientes	Tratamiento							
N	ACE >	MCE >	MOE >	MOA >	ACT >	MOT >	MCA >	MCT
P	ACE >	MCE >	MOE >	MOT >	ACT >	MCT >	MCA >	MOA
K	ACE >	MCE >	MOE >	ACT >	MCT >	MOT >	MOA >	MCA
Mg	ACE >	MCE >	MOE >	ACT >	MOA >	MCT >	MOT >	MCA
Ca	ACE >	MOE >	MCE >	MOT >	MCT >	ACT >	MOA >	MCA

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico.

3.4.1.1.1 Nitrógeno

Uno de los elementos más importantes en los agroecosistemas sostenibles es el manejo del nitrógeno. Esta variable bajo estudio mostró diferencias significativas ($p = 0.0026$) entre tratamientos, siendo los tratamientos con *Erythrina* ACE, MCE y MOE, los que mostraron una mayor liberación al sistema en 119 días con rangos de 75% a 89%, (Cuadro 13 y Cuadro 154). Este comportamiento puede estar relacionado con la rápida descomposición del material vegetal que presenta la especie. Las otras especies evaluadas (*Terminalia*, *Abarema*) aunque no difieren entre sí estadísticamente el mayor

porcentaje liberado se logra con el tratamiento MOA. El 50% del nitrógeno se libera en el tratamiento ACE en aproximadamente 5 días, en el MOE en 6 días y en el MCE en 9 días, mientras que los otros tratamientos requieren de periodos mayores a las 17 semanas (119 días) para liberar el 50% del nitrógeno (Figura 3). Al realizar un análisis de regresión en el tiempo para determinar la curva de mejor ajuste no se encontró un modelo general que describiera el comportamiento de liberación del N para todos los tratamientos (Anexo 2). Munguia (2003) encontró tendencias similares con hojarasca de *E. poeppigiana*, *E. deglupta* y café en la finca Verde Vigor, Pérez Zeledón, Costa Rica, destacándose *E. poeppigiana* como la especie de sombra que libera más rápido el nitrógeno aunque difiere en el porcentaje liberado y el tiempo requerido (65% en 24 días) y como la más lenta *E. deglupta* donde no se produjo liberación de este elemento y en combinación con café solo el 2% en 24 días. Osorio (2004) encontró en 126 días de evaluación que la hojarasca de café libera el 49% de nitrógeno y el 46% en *Inga densiflora* con una tasa de liberación (k) de -0.18 y -0.17 por día respectivamente.

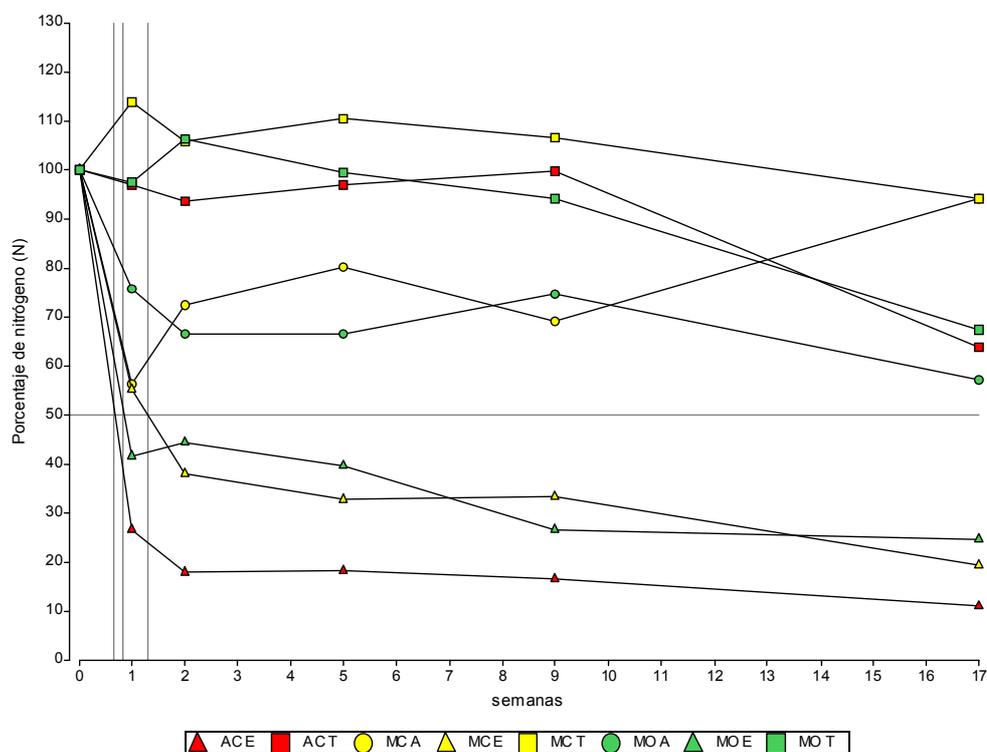


Figura 3. Porcentaje de liberación de nitrógeno en residuos de poda de *Erythrina* (E), *Terminalia* (T), *Abarema* (A) bajo diferentes sistemas de manejo (AC, MC, MO) en sistemas agroforestales con café, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

3.4.1.1.2 Fósforo

Al evaluar la liberación del fósforo durante diecisiete semanas (Cuadro 14) no se encontró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.2165$). Sin embargo la especie de *Erythrina* con los

diferentes manejos fue la que más rápido liberó el fósforo. El comportamiento más lento de liberación se obtuvo con *Abarema* en especial el medio orgánico. El 50% de liberación de este nutriente se obtiene en los tratamientos ACE con 5 días, MCE con 27 días, MOE con 32 días y MOT con 113 días. Los otros tratamientos requieren de un tiempo mayor de 17 semanas (119 días) para liberar el 50% del fósforo (Figura 54). Para este nutriente la tasa de liberación no ajustó un modelo que describiera su comportamiento para todos los tratamientos, sin embargo podemos ver por separado (Anexo 2) que la especie de *Erythrina* ajustó en un modelo logarítmico, siendo el tratamiento ACE el de mayor tasa de liberación con una constante (k) de -0.39 por semana. *Terminalia* ajusta en un modelo lineal y la mayor tasa de liberación se obtiene en el tratamiento MOT con (k) de -2.93 por semana, seguido del ACT con (k) de -2.42 por semana y MCT con (k) de -2.12 por semana. *Abarema* no presenta un comportamiento estable de liberación e incluso en el tratamiento MCA no ajusta en ningún modelo matemático. Para este nutriente Munguía (2003) reporta en *E. poeppigiana* una liberación más lenta a la encontrada en este estudio, con tan solo un 14% en 24 días y a los 213 días el 96% con tasa (k) de -0.94 por día. Sin embargo en hojarasca de *E. deglupta* no se encontró un patrón definido de liberación muy parecido a lo obtenido con *Abarema*, pero al mezclarse *E. deglupta* y *E. poeppigiana* se alcanza una tasa (k) de -0.62 por día lográndose un 21% de liberación en 24 días y 87% en 213 días.

Soto *et al.* (2002) encontraron en plantaciones de 4 años de palmito durante 48 semanas 73% fósforo liberado con una tasa (k) de 0.228 por semana. Guo y Sims (1999) encontraron que las altas densidades poblacionales de *Eucalyptus* sp tenían pocas influencia en la descomposición de hojarasca y liberación del nitrógeno pero tenían un efecto significativo en la liberación del fósforo por lo que es importante conocer el manejo racional de las densidades basado en la fluctuación de descomposición y ciclaje de nutrientes de los ecosistemas.

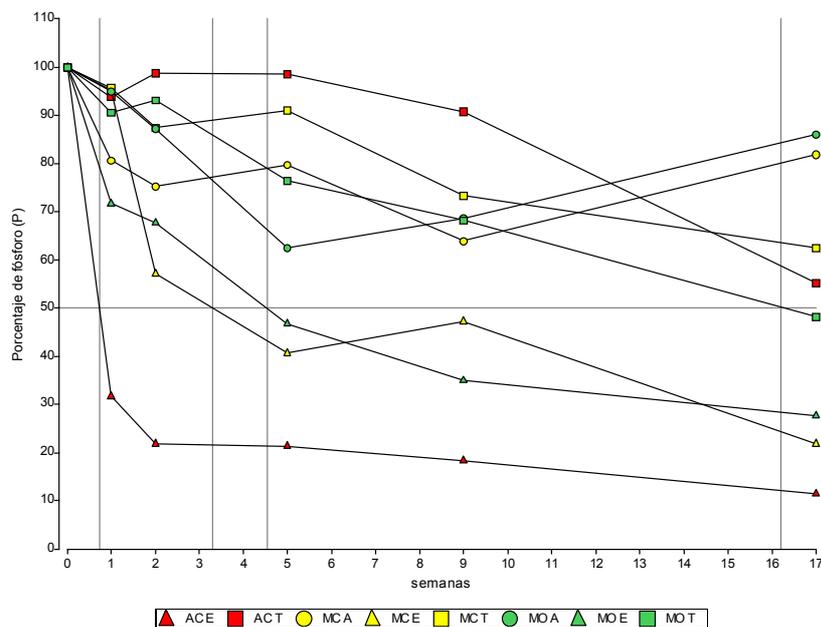


Figura 4. Porcentaje de liberación de fósforo en residuos de poda de *Erythrina* (E), *Terminalia* (T), *Abarema* (A) bajo diferentes sistemas de manejo (AC, MC, MO) en sistemas agroforestales con café, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

3.4.1.1.1.3 Potasio

El potasio presenta el porcentaje de liberación más alto de todos los nutrientes. A pesar de que no hubo diferencias significativas (Cuadro 13) para el potasio entre tratamientos ($p=0.2124$), se observa que *Erythrina* fue la especie que más rápido liberó el potasio con los diferentes manejos sobre todo los convencionales, seguido de *Terminalia* siendo también más rápido los convencionales que los orgánicos. Por último se encuentra la especie *Abarema* que dentro de esta la liberación es mayor en el manejo orgánico.

El 50% del potasio se libera en los tratamientos: ACE en 4 días, MOE en 7 días, ACT en 7 días, MCE en 11 días, MCT en 11 días, MCA en 12 días, MOT en 14 días, MOA en 23 días (Figura 5). Todos los tratamientos liberan el 50% del potasio en un corto plazo.

La curva de mejor ajuste que describe el comportamiento para este nutriente se obtiene a través del modelo logarítmico (Anexo 2) y la especie de mayor tasa de liberación es *Erythrina* sobre todo con manejo convencional (AC con (k) de -0.87 por semana, MC con (k) de -0.74 por semana), el MOE libera a una velocidad (k) de -0.65 por semana, seguido de *Terminalia* con la misma tendencia primero los convencionales (MCT con (k) de -0.50 por semana, ACT con (k) de -0.48 por semana) y luego el orgánico (MOT con (k) de -0.44 por semana) y por último se encuentra *Abarema* (MOA con (k) de -0.41 por semana y MCA con (k) de -0.37 por semana). Estos resultados son contrarios a lo encontrado por Munguía (2003) con respecto a la liberación del potasio en hojarasca de *E. poeppigiana* en tan solo

24 días obtuvo una liberación de 39% y al cabo de 213 días obtuvo el 99% de liberación con una tasa de -1.55 por día, obteniendo el valor más alto con respecto a los otros tratamientos y nutrientes y con *E. deglupta* encontró que libera en 24 días el 17% y al cabo de 213 días el 88% con tasa de liberación (k) de -0.49 por día siendo el de menor valor. Soto *et al.* (2002) encontraron una rápida liberación del potasio en residuos de palmito durante diez semanas 91% y una tasa de liberación (k) de 0.2805 por semana.

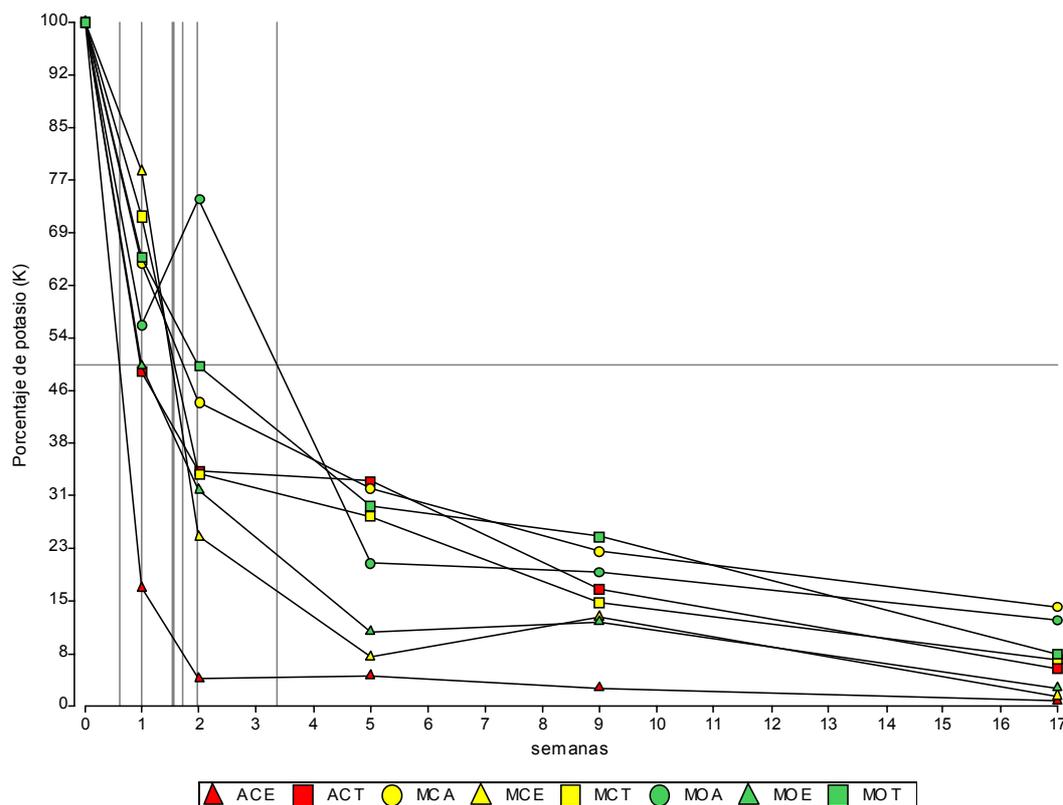


Figura 5. Porcentaje de liberación de potasio en residuos de poda de *Erythrina* (E), *Terminalia* (T), *Abarema* (A) bajo diferentes sistemas de manejo (AC, MC, MO) en sistemas agroforestales con café, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

3.4.1.1.1.4 Magnesio

Para la variable magnesio (Mg) no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 13) entre los tratamientos ($p=0.1551$), sin embargo la mayor liberación se obtuvo con *Erythrina* en especial con manejo convencional (ACE y MCE) seguido del manejo orgánico (MOE). *Terminalia* tiene un comportamiento intermedio de liberación sobre todo con manejo alto convencional (ACT), mientras que el medio orgánico de *Abarema* (MOA) libera más rápido que *Terminalia* medio convencional (MCT) y medio orgánico (MOT).

Los tratamientos que liberan el 50% del magnesio son: ACE en 6 días, MOA en 32 días, MOE en 47 días, MCT en 57 días, ACT en 75 días, MCE en 85 días, MOT en 96 días. Excepto el MCA que requiere de más de 17 semanas (119 días) para liberar el 50% del magnesio (Figura 6). *Erythrina* con manejo alto convencional es el tratamiento que más rápido libera el magnesio, mientras que los tratamientos orgánicos de *Abarema* (MOA) y *Erythrina* (MOE) tienen un comportamiento de liberación moderado. Los tratamientos convencionales de *Terminalia* (MCT y ACT) y *Erythrina* (MCE) tienen una liberación intermedia de magnesio excepto el ACE que mostró una liberación rápida (6 días). Para este nutriente se buscó la curva de mejor ajuste que describiera la tasa de liberación, pero no se encontró un modelo que describiera adecuadamente el comportamiento de liberación para todos los tratamientos (Anexo 2). Sin embargo los modelos lineal y logarítmico son los que prevalecen en los tratamientos tanto para *Erythrina* y *Terminalia*.

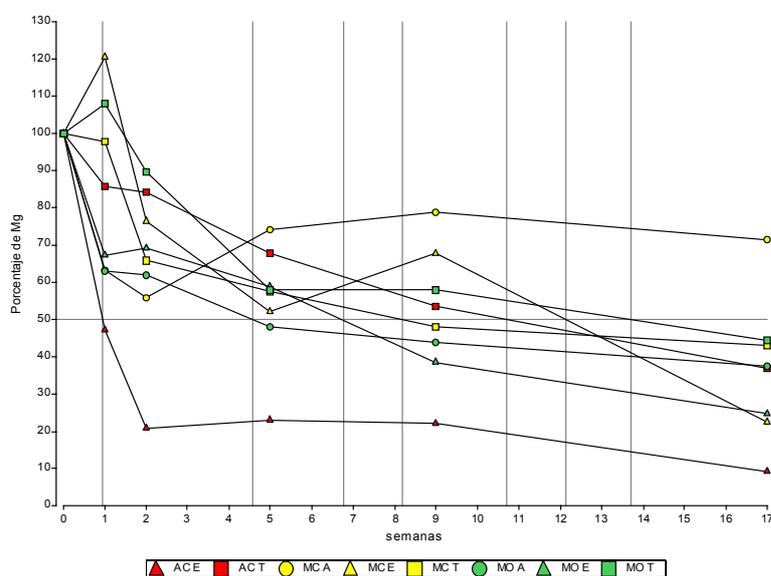


Figura 6. Porcentaje de liberación de magnesio en residuos de poda de *Erythrina* (E), *Terminalia* (T), *Abarema* (A) bajo diferentes sistemas de manejo (AC, MC, MO) en sistemas agroforestales con café, CATIE, Turrialba, Costa Rica.).

Al respecto estos resultados no coinciden con los reportados por Munguía (2003) para *E. poeppigiana*, un 7% de liberación de magnesio en 24 días y 97% liberado en 213 días con tasa (k) de liberación -1.02 por día, mientras que para *E. deglupta* en tan solo 24 días encuentra ausencia de liberación de magnesio y al cabo de 213 días obtiene 19% de liberación con tasa (k) de -0.013 por día, pero cuando mezcló hoja de *E. poeppigiana* y *E. deglupta* aumentó el porcentaje de liberación a 64% con tasa (k) de 0.32 por día. Soto *et al.* (2002) en su estudio de residuo de palmito de 4 años de establecido encontró que el 85% del magnesio era liberado durante 48 semanas. Guo y Sims (2002)

encontraron que factores internos de la hoja (celulosa y lignina) influyen en la descomposición y liberación de nutrientes (potasio, calcio, magnesio, manganeso) en hoja de *Eucalyptus ssp.*

3.4.1.1.5 Calcio

La tasa de liberación del calcio (Anexo 2) muestra una tendencia más variable que la observada para potasio (K) y magnesio (Mg) ubicándose como el nutriente que presenta el porcentaje más bajo de liberación en la mayoría de los tratamientos evaluados (Cuadro 13). Además no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p=0.4781$), sin embargo la mayor liberación se obtiene con la especie de *Erythrina* y sobre todo en el manejo alto convencional (ACE). La especie que libera más lentamente este nutriente es *Abarema* con el manejo medio convencional (MCA). Solo *Erythrina* con manejo alto convencional (ACE) libera el 50% de calcio en aproximadamente 10 días. Se requieren de periodos mayores a 17 semanas (119 días) para que los otros tratamientos puedan liberar el 50% de calcio (Figura 7).

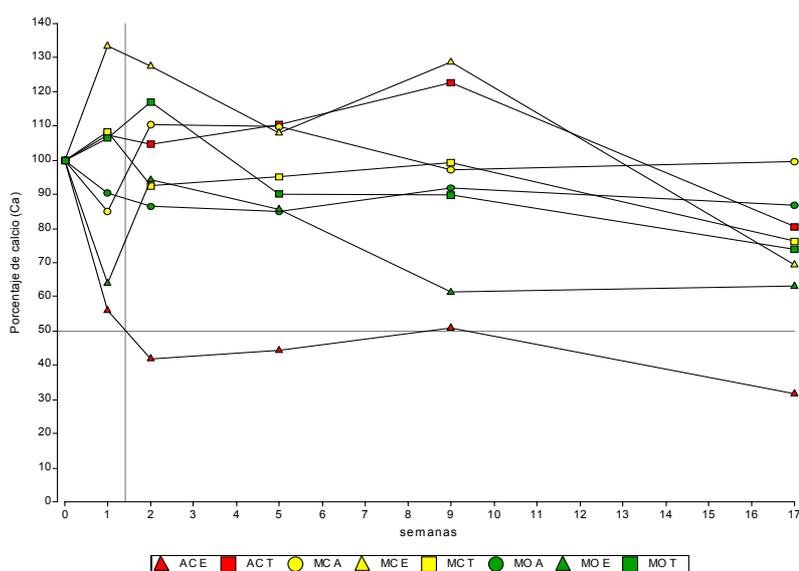


Figura 7. Porcentaje de liberación de calcio en residuos de poda de *Erythrina* (E), *Terminalia* (T), *Abarema* (A) bajo diferentes sistemas de manejo (AC, MC, MO) en sistemas agroforestales con café, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Munguía (2003) reporta para *E. poeppigiana* una liberación de 67% de calcio en 213 días con tasa (k) de -0.5 por día, mientras que los tratamientos con *E. deglupta* + *Café arabica* + *E. poeppigiana* y la mezcla de *E. deglupta* + *E. poeppigiana* inician la liberación de calcio a partir de los 100 días con tasa de liberación (k) de -0.13 y -0.14 por día respectivamente. Se considera que esta lenta liberación es atribuible al tipo de enlace que forma este elemento con otros elementos de la pared celular. Soto *et al.*

(2002) encontró en residuos de palmito 67% de liberación de calcio en 48 semanas con tasa (k) de 0.030 por semana.

3.4.1.1.2 Kilogramos de nutrientes liberados al sistema

Se evaluó la cantidad de nutrientes liberados al sistema de acuerdo al aporte promedio de las dos podas ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el porcentaje de liberación. Se encontró que *Erythrina* (Cuadro 15) es la especie que más nutrientes libera al sistema bajo las condiciones del estudio en 119 días, con el siguiente orden MCE>MOE>ACE. *Terminalia* con manejo alto convencional (ACT) ocupa el segundo lugar de importancia, sin embargo MOT y MCT tienen un comportamiento variado de liberación e incluso en algunos nutrientes figuran como los más bajos (Cuadro 176). Dentro del grupo de *Abarema* el medio orgánico (MOA) libera más rápido que los tratamientos MOT y MCT. El comportamiento general del aporte de los nutrientes liberados al sistema se da bajo el siguiente orden: $\text{N} \geq \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$.

Para la variable de nitrógeno se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0001$), siendo los tratamientos MCE con $144.78 \text{ kg ha}^{-1}$ y MOE con $112.78 \text{ kg ha}^{-1}$ los que mayor aporte de nitrógeno suministraron al sistema, seguido de ACE. A pesar de que el ACE tiene el mayor porcentaje de liberación (89.02%) con respecto al MCE (80.43%) y MOE (75.15%) no fue el tratamiento que mayor aporte brindó al sistema, debido a que la cantidad promedio ($33.33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de nutrientes encontrada en la poda era inferior con respecto al MCE y MOE. La segunda especie de sombra importante en el aporte de nitrógeno es *Abarema* con manejo medio orgánico con 42.87 % de liberación aporta $21.46 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El aporte de nutriente más bajo se registra en el grupo de *Terminalia* con el tratamiento MCT su aporte es menor de un kilo ($0.60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). El MCT con 5.82% de liberación solo aporta $3.77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ al sistema, mientras que el ACT tiene un mayor aporte de nutriente $10.47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ un 50% menor que el MOA.

Cuadro 15. Cantidad total de nutrientes (kg/ha) liberado del residuo de poda de árboles de sombra (*E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda*) después de 17 semanas de la poda bajo sistemas de café orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	N	P	K	Mg	Ca
MCT	0.60 a	0.32 a	4.83 a	0.57 a	2.46 a b
MOT	3.10 a	0.51 a	4.66 a	0.53 a	2.48 a b
MCA	3.77 a	0.43 a	10.06 a	0.59 a	0.07 a
ACT	10.47 a	0.91 a	12.5 a	2.07 a	4.08 a b
MOA	21.46 a	0.33 a	10.06 a	1.26 a	1.45 a b
ACE	33.33 a	2.71 a	22.86 a	2.64 a	7.40 b
MOE	112.78 b	9.20 b	90.83 b	7.08 b	17.95 c
MCE	144.78 b	11.59 b	101.00 b	9.10 b	17.62 c
p-valor	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002

Letras distintas en la misma columna denotan diferencias significativas ($p < 0.05$). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico.

Cuadro 16. Ordenamiento de acuerdo con la cantidad de nutrientes (kg ha⁻¹) liberado en sistemas orgánico y convencional de café, Turrialba, Costa Rica.

Nutriente	Tratamientos
N	MCE>MOE>ACE>MOA>ACT>MCA>MOT>MCT
K	MCE>MOE>ACE>ACT>MCA>MOA>MCT>MOT
Ca	MOE>MCE>ACE>ACT>MOT>MCT>MOA>MCA
P	MCE>MOE>ACE>ACT>MOT>MCA>MOA>MCT
Mg	MCE>MOE>ACE>ACT>MOA>MCA>MCT>MOT

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico.

En cuanto al potasio se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0001$), los mayores aportes de potasio están dado por *Erythrina* en especial MCE, MOE seguido de ACE aunque su porcentaje de liberación es el más alto (99.05%) no difiere estadísticamente de los otros tratamiento (Cuadro 165). *Terminalia* con manejo alto convencional liberó un 94.35% de su contenido total promedio de nutriente obtenido en la poda, y registró un aporte de 12.50 kg K ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo MCT con 93.2% y MOT con 92.2%; estos a pesar de tener un porcentaje alto de liberación fueron los que menor aporte proporcionaron al sistema. *Abarema* MCA aporta 10.06 kg K ha⁻¹ año⁻¹ y MOA con 10.06 kg K ha⁻¹ año⁻¹ tuvieron un aporte muy similar a lo obtenido con ACT (Cuadro 165).

Para calcio se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0002$). Los mayores aportes del nutriente se registran en *Erythrina* en especial MOE 17.95 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹ y MCE con 17.62 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 165). El ACE presenta una reducción de 59% con respecto a los tratamientos MOE y MCE a pesar de tener el porcentaje más alto de liberación (68.21%). *Terminalia* ocupa el segundo lugar de importancia en el aporte de calcio al sistema en especial ACT con (4.08 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹). El MOT con 2.48 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹ y MCT con 2.46 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹ presentan un aporte similar de nutriente debido a que tienen un porcentaje de liberación muy parecido. *Abarema* es la especie de sombra que aporta menos calcio al sistema, ya que solo un 13.22% es liberado durante 119 días que duro el estudio, con un aporte de 1.45 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹, el MCA libera solo 0.53% del promedio anual de calcio y esto representa 0.07 kg Ca ha⁻¹ año⁻¹.

Al evaluar la variable magnesio se encontraron diferencias significativas entre tratamiento ($p=0.0001$), siendo *Erythrina* la especie que mayor aporte de magnesio brinda al sistema en especial MCE y MOE (Cuadro 165). El ACE a pesar de tener el mayor porcentaje de liberación (90.76%) su aporte es bajo 2.64 kg Mg ha⁻¹ año⁻¹ por la reducida biomasa que aporta al sistema.

Terminalia alto convencional (ACT) tiene un aporte de 2.07 kg Mg ha⁻¹ año⁻¹ muy similar al ACE. El MCT y MOT aportan solo 0.57 y 0.53 kg Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente siendo los aportes más bajos de magnesio al sistema. *Abarema* con manejo medio orgánico (MOA) solo aporta 1.26 kg

Mg ha⁻¹ año⁻¹. El MCA 0.59 kg Mg ha⁻¹ año⁻¹ tiene un aporte similar que MCT y MOT. Lo cual demuestra que libera poco magnesio al sistema de café.

Para el fósforo (Cuadro 165) se encontró diferencias significativas entre tratamientos siendo *Erythrina* la especie de sombra que mayor aporte brinda al sistema (Cuadro 176) bajo el siguiente orden MCE>MOE>ACE. El MCE aportó 11.59 kg P ha⁻¹ año⁻¹ y MOE 9.18 kg P ha⁻¹ año⁻¹. A pesar de que ACE tenía el porcentaje más alto de liberación (88.53%) su aporte 2.74 kg P ha⁻¹ año⁻¹ no fue proporcional debido a la cantidad de fósforo en la biomasa de la poda. *Terminalia* y *Abarema* son los que menor aporte de fósforo incorporan al sistema (menos de un kg ha⁻¹ año⁻¹).

Soto *et al.* (2002) evaluaron los aportes (kg ha⁻¹) de nutrientes N, P, K, Ca, Mg liberados en residuos de palmito durante 48 semanas en plantaciones de 4 y 8 años encontrando que los aportes de nutrientes oscilan entre 93 y 107 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, 14 a 15 kg ha⁻¹ año⁻¹ de P, 90-116 kg ha⁻¹ año⁻¹ de K, 19 a 23 kg ha⁻¹ año⁻¹ de Ca y 13 a 14 kg ha⁻¹ año⁻¹ de Mg. Estos valores a pesar de ser menores a lo encontrado en la presente investigación juegan un papel importante en la nutrición del palmito y la estabilidad del sistema por sus aportes continuos y poca extracción en la cosecha.

3.4.2 Liberación de la materia seca en broza

Se evaluó la descomposición del material vegetal de la broza fresca (abono orgánico) en los tratamientos orgánicos durante diecisiete semanas (119 días) y se encontraron diferencias significativas entre tratamiento ($p=0.0114$). *Erythrina* es la especie de sombra donde se obtiene mayor liberación del material vegetal de broza con 69% (Anexo 3), seguido de *Terminalia* con 52% y *Abarema* con 51%, es posible que esta influencia se deba a que en *Erythrina* se observó mayor colonización de macro fauna (caracoles) y un mejor micro clima (humedad) que favorecen la actividad de estos organismos. Se buscó la curva de mejor ajuste para describir la tasa de liberación (k) y se encontró que el modelo logarítmico es el que mejor ajusta para todos los tratamientos (Anexo 3), siendo el MOE el de mejor tasa de liberación (k) de 1.26 por semana, seguido por MOT (k) de 1.24 por semana y MOA (k) de 0.23 por semana.

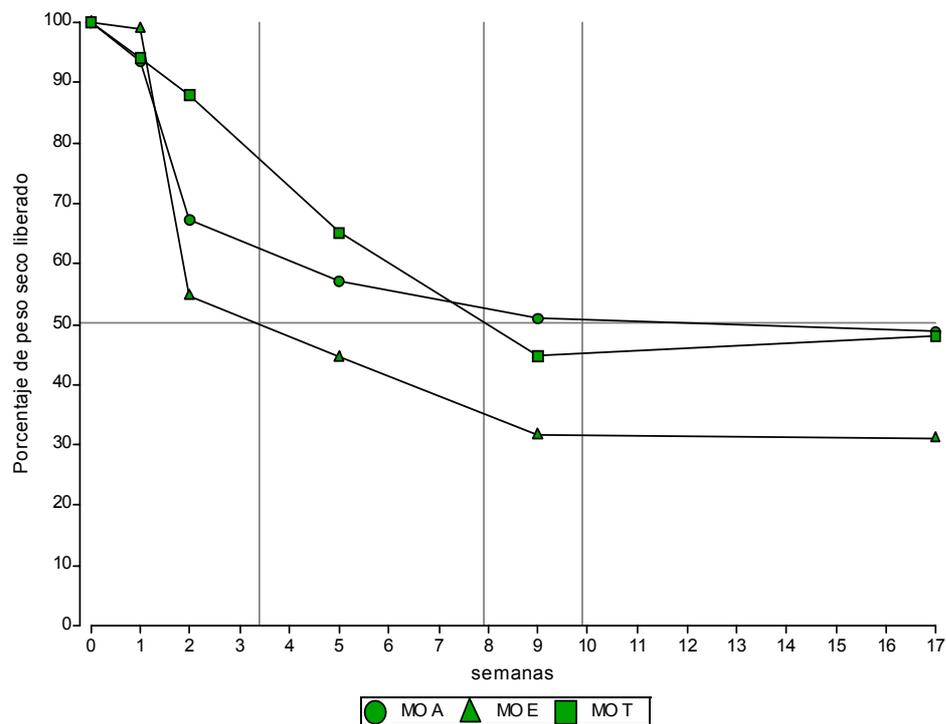


Figura 8. Porcentaje de materia seca descompuesta de broza (abono orgánico) durante diecisiete semanas en sistemas agroforestales de café orgánico, con especies de sombra *Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*, *Turrialba*, Costa Rica.

El 50% de la materia seca descompuesta se obtuvieron en los tratamientos MOE en 24 días, (Figura 8) MOT en 55 días y MOA en 69 días. Para el caso de la pérdida de materia seca en broza Muñoz (2002) encontró en 209 días de evaluación pérdidas menores de materia seca a lo encontrado en esta investigación. En compost de broza 35.9%, en compost de residuo 13.3% y en lombricompost 6.9%, explicado por un modelo de ajuste lineal para esta variable. La tasa de descomposición (k) reportada fue de 0.17 por día para compost de broza, (k) de 0.06 por día para compost de residuo y (k) de 0.03 por día para lombricompost. Esta variación en los resultados posiblemente se deba a que previamente (2 meses) de colocarlo en campo se había realizado el compostaje (material más estable), mientras que para este estudio se utilizó broza fresca traído del beneficio de café.

3.4.2.1 Liberación de nutrientes en broza de café

Al evaluar el comportamiento de liberación de nutrientes en los tratamientos orgánico en el sitio de estudio durante diecisiete semanas (119 días), no se encontraron diferencias significativas para N ($p=0.0842$), P ($p=0.4646$), K ($p=0.6444$), Mg ($p=0.2531$), Ca ($p=0.1577$). En término general la tendencia de liberación para todos los nutrientes fue: $K > Mg > P > N > Ca$ (Cuadro 187). En los sistema

fue bajo el siguiente orden: MOE > MOA > MOT, siendo el sistema con sombra de *Erythrina* donde se observa una mayor tendencia de liberación de los nutrientes de la broza y el sistema con *Terminalia* la que menor influye en la liberación de nutrientes.

Cuadro 17. Porcentaje de nutrientes liberado durante 119 días en broza con manejo orgánico en sistemas agroforestal con café, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	%K	%Mg	%P	%N	%Ca
MOE	96.08	61.25	57.37	58.04	42.98
MOA	93.37	42.12	42.00	39.53	17.87
MOT	92.11	41.29	39.86	38.40	17.17
p-valor	0.6444	0.2531	0.4646	0.0842	0.1577

Significancia al nivel del 5% ($p < 0.05$), ns: no significativos ($p > 0.05$). *E: Erythrina, T: Terminalia, A: Abarema, MO: Medio orgánico*

3.4.2.1.1 Nitrógeno

Es importante conocer la cantidad y velocidad de liberación de nitrógeno al sistema. Para esta variable el modelo que describe el comportamiento de liberación es logarítmico. En el sistema MOE se presenta el mayor porcentaje de liberación con 58.04% y la mayor tasa de liberación (k) de -0.32 por semana, seguido del sistema MOT con (k) de -0.23 por semana y 38.40% liberado, el sistema MOA presenta la tasa más baja con (k) de -0.18 por semana y 39.53% liberado en 119 días. Este comportamiento de liberación puede estar asociado en que las especies leguminosas proveen mayor recurso o fuente de energía (N) para la actividad microbiana.

El 50% se libera (Figura 9) en los sistema MOE en 35 días y en el sistema MOT en 58 días, mientras que el sistema MOA requiere de un periodo mayor a 119 días (17 semanas).

Datos contrarios muestra Muñoz (2002) al referirse que en los primero 98 días de evaluación no se encontró liberación importante en los tratamientos evaluados, sin embargo para los 209 días que duro el ensayo la liberación de broza había alcanzado el 37%, mientras que el lombricompost y el compost de residuo había alcanzado el 24% de liberación. Este comportamiento es importante para ajustar la aplicación del abono de acuerdo la mayor exigencia o necesidad del cultivo.

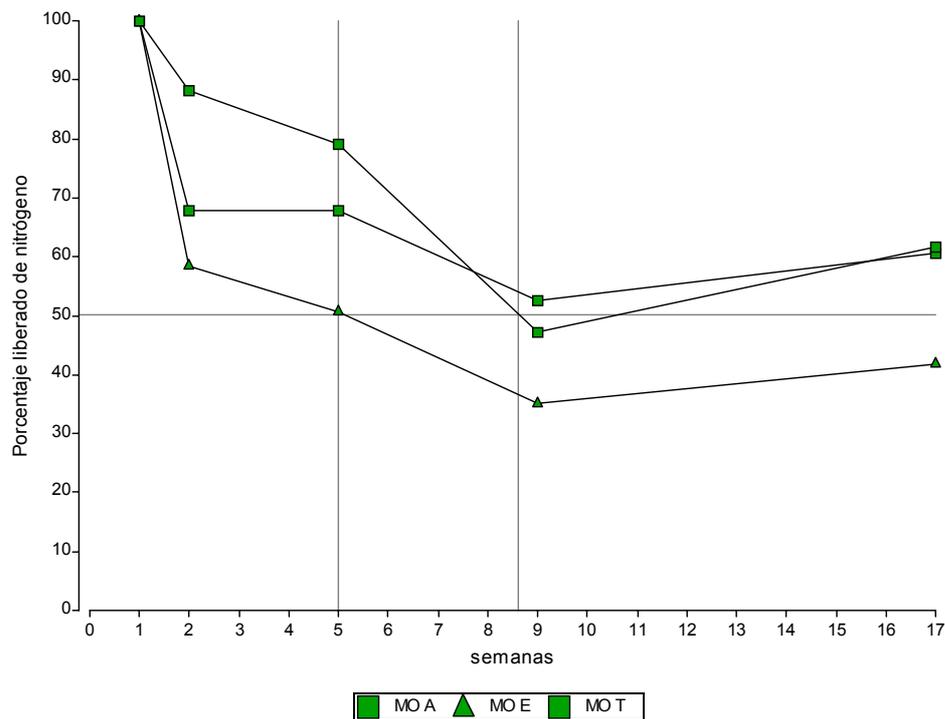


Figura 9. Porcentaje de nitrógeno liberado por semana en residuo de broza en sistema orgánico de café, con tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*), Turrialba, Costa Rica.

3.4.2.1.2 Fósforo

Para esta variable no se encontró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.4646$) sin embargo el mayor porcentaje de liberación se encontró en MOE con 57.37%, seguido de MOA con 42.0 % y MOT con 39.86%. En cuanto al fósforo no hay un modelo general que describa el comportamiento de liberación, sin embargo el tratamiento MOE y MOT ajustan su comportamiento a un modelo logarítmico (Anexo 3). El 50% de fósforo (Figura 10) se libera en el tratamiento MOE en 24 días, mientras que MOT y MOA requieren de un periodo mayor a 119 días (17 semanas). Al respecto, Muñoz (2002) encontró comportamiento parecido de liberación para esta variable en estudio en 209 días, siendo la liberación del fósforo en lombricompost de 38% y compost de broza 61%, estos tratamientos ajustaron mejor con un modelo lineal, mientras que en el tratamiento de compost de residuo la liberación fue tan sólo del 15%. Además no encontró un modelo que describiera la liberación del fósforo en este tratamiento.

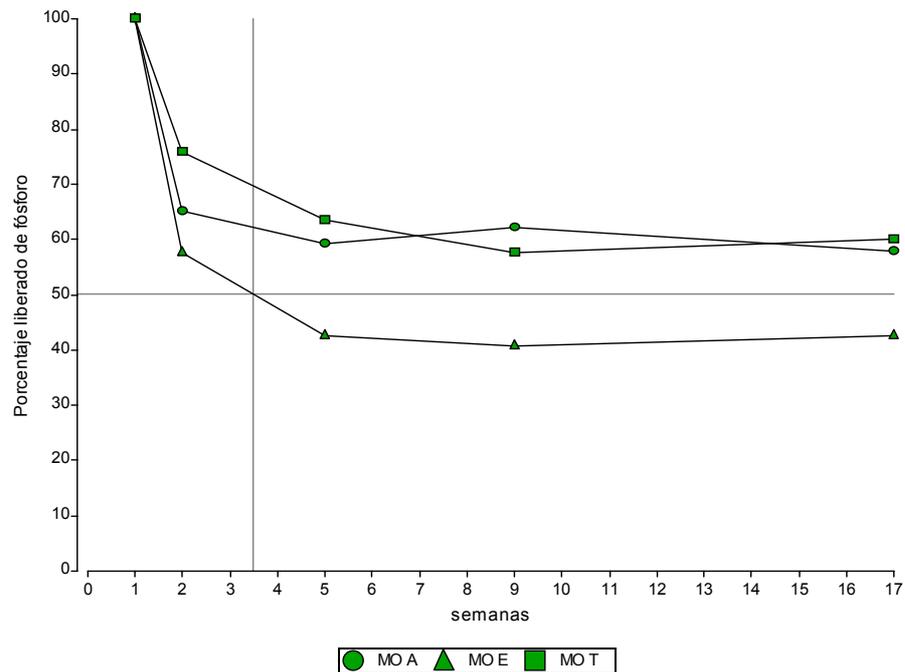


Figura 10. Porcentaje de fósforo liberado por semana en residuo de broza en sistema orgánico de café, con tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*), Turrialba, Costa Rica.

3.4.2.1.3 Potasio

A pesar de que no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.6444$) el mayor porcentaje liberado se obtuvo con MOE 96.08% seguido de MOA con 93.37% y MOT con 92.11%. La curva que mejor describe la tasa de liberación del potasio es la logarítmica. El tratamiento MOE es el que presenta mayor tasa de liberación con (k) de -1.17 por semana, sin embargo el MOT con (k) de -0.98 por semana y MOA con (k) de -0.97 por semana tienen un comportamiento similar de liberación.

El 50% del potasio (Figura 11) se libera en los tratamientos MOT en 32 días, MOE en 35 días y MOA en 42 días. Resultados contrarios encontró Muñoz (2002) al evaluar diferentes abono orgánico tipo compost bajo las mismas condiciones de este estudio (localidad). Para los tratamientos lombricompost y compost de residuo encontró una ecuación no lineal que describe la liberación del potasio, mientras que en el compost de broza es descrita por una ecuación lineal. Además encontró liberación de este nutriente por el orden de 98% para el compost de broza, 91% para compost de residuo y 79% para lombricompost en 209 días que duro el estudio, porcentajes muy similar a lo encontrado en este estudio (Cuadro 17) pero en menor tiempo 119 días, es muy posible que esta diferencia se deba a que el compost es más estable (maduro) con relación a la broza fresca (inmadura o inestable).

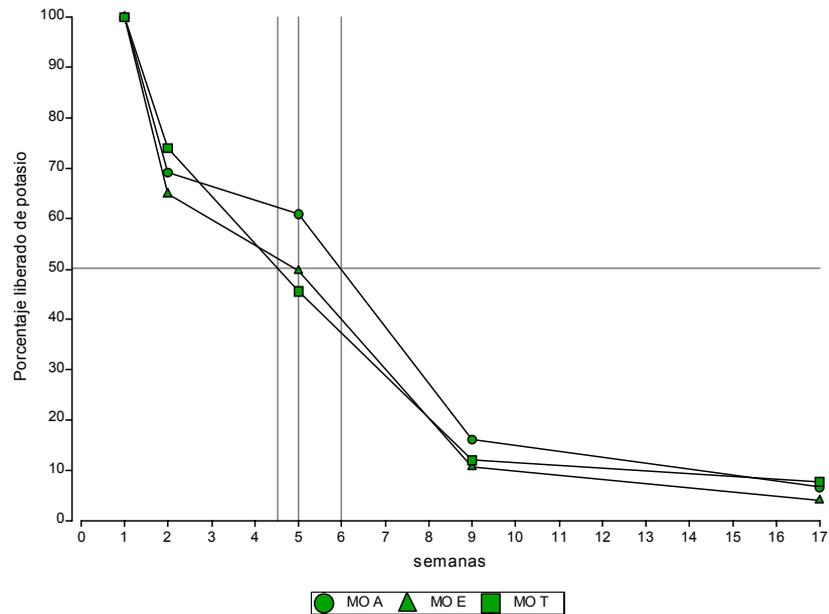


Figura 11. Porcentaje de potasio liberado por semana en residuo de broza en sistema orgánico de café, con tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*), Turrialba, Costa Rica.

3.4.2.1.2. Magnesio

A pesar de que no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.2531$) el mayor porcentaje liberado fue MOE con 62.25%, seguido de MOA con 42.12% y MOT con 41.29%. La curva de mejor ajuste que explica el comportamiento de este nutriente se obtiene a través de un modelo logarítmico. La mayor tasa (k) de liberación se obtiene con MOE a -0.30 por semana seguido de MOT con (k) de -0.20 por semana y MOA con (k) de -0.17 por semana.

El 50% de liberación del magnesio se logra en el tratamiento MOE en 57 días, mientras que los tratamientos MOA y MOT requieren de mayor periodo (119 días) para liberar el 50% (Figura 12).

Para este nutriente Muñoz (2002) encontró un modelo lineal para compost y lombricompost de broza mientras que el tratamiento compost de residuo no presentó un ajuste. En 209 días es liberado el 35% y 42% de magnesio en lombricompost y compost de broza respectivamente y solo el 25% en compost de residuo, siendo porcentaje de liberación parciales a los encontrados en este estudio en 119 días.

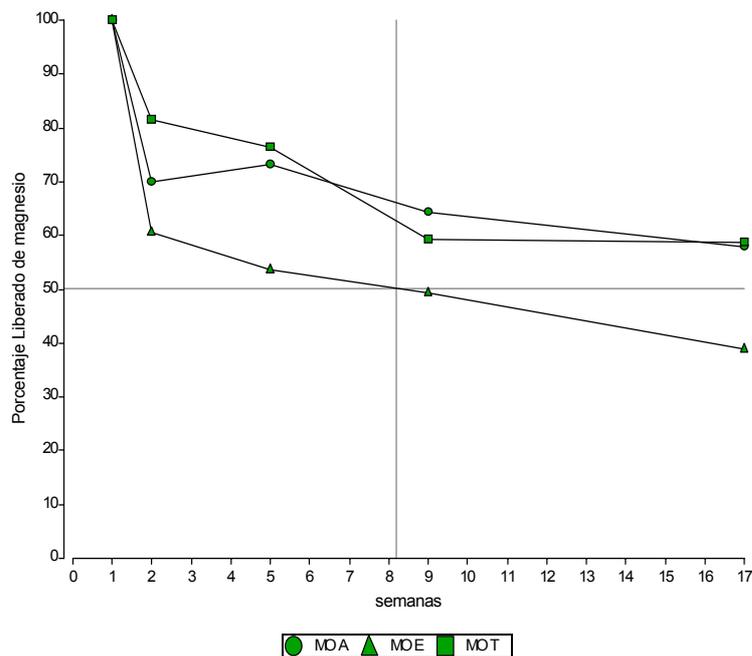


Figura 12. Porcentaje de magnesio liberado por semana en residuo de broza en sistema orgánico de café, con tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*), Turrialba, Costa Rica.

3.4.2.1.5 Calcio

Para el calcio no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.1577$), sin embargo el mayor porcentaje se obtuvo en el sistema MOE con 42.98%, mientras que MOA y MOT tuvieron comportamiento similares 17.87% y 17.17% respectivamente. Para esta variable se buscó la curva que mejor describiera la tasa de liberación y no se encontró un modelo que describiera adecuadamente este comportamiento (Anexo 3) por lo que no fue posible una comparación estadística.

El 50% de este nutriente se libera en el tratamiento MOE en 50 días, mientras que el tratamiento MOA y MOT requieren de periodos mayores a 119 días (17 semanas) para liberar el 50% (Figura 13).

Resultados obtenidos por Muñoz (2002) demuestran la baja liberación de este nutriente, en el transcurso de 209 días se obtuvo el 22% de liberación en compost de broza y 30% para lombricompost y estos ajustaron su tasa de liberación a un modelo lineal, mientras que para el compost de residuo no mostró liberación en el tiempo establecido, además no mostró ajuste en ningún modelo. Esta diferencia porcentual posiblemente se deba a que los abonos orgánicos tipo compost son más estables que la broza fresca por tanto este nutriente forma parte estructural del tejido vegetal y provoca una liberación más lenta.

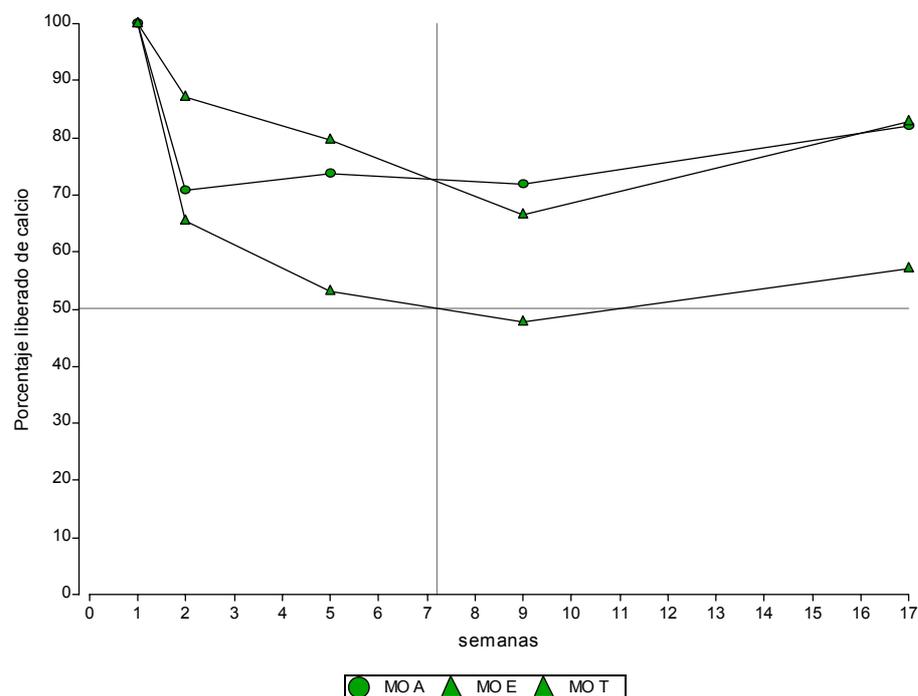


Figura 13. Porcentaje de calcio liberado por semana en residuo de broza en sistema orgánico de café, con tres diferentes tipos de sombra (*Erythrina*, *Terminalia*, *Abarema*), Turrialba, Costa

3.4.2.2. Kilogramos por hectárea de nutrientes liberados en broza de café

Se evaluó la cantidad (kg ha^{-1}) de nutrientes liberados al sistema de café de acuerdo al aporte (10 t ha^{-1}) del abono orgánico (broza fresca de café) durante 119 días (17 semanas) en el sitio bajo estudio. No se encontró (Cuadro 18) diferencias significativas entre tratamientos para cada nutriente K ($p=0.9256$), N ($p=0.1530$), Ca ($p=0.0725$), Mg ($p=0.2553$), P ($p=0.1671$). En término general la tendencia de liberación de nutrientes fue: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$ y en los tratamientos el comportamiento fue: $\text{MOE} > \text{MOA} > \text{MOT}$, Siendo la especie de sombra *Erythrina* la que libera más rápido y *Terminalia* la más lenta.

Cuadro 18. Cantidad de nutrientes (kg/ha) liberado en residuo de abono orgánico (broza de café) durante diecisiete semanas en sistemas agroforestales de café orgánico, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	K (kg)	Mg (kg)	P (kg)	N (kg)	Ca (kg)
MOE	24.60	2.04	1.30	26.39	6.45
MOA	25.71	1.24	0.92	17.00	2.43
MOT	27.20	1.29	0.86	16.08	2.36
p-valor	0.9256	0.2553	0.1671	0.1530	0.0725

Significancia al 5% ($p < 0.05$), ns: no significativo al 5% ($p > 0.05$). E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, MO: Medio orgánico

3.5. Conclusiones

1. *Erythrina poeppigiana* árbol leguminoso de servicio fue la que mostró mayor descomposición del material vegetal con rango de 51% a 85% al cabo de 119 días, diferenciándose sobre todo con los tratamientos convencionales (ACE, MCE) con respecto a *T. amazonia* (especie maderable) con rango de 45% a 54% y *A. idiopoda* (leguminosa maderable) con rango de 38% a 42%. Esta tendencia también se obtuvo cuando se evaluó el 50% de material vegetal en descomposición.
2. En término general se encontró que la liberación de nutrientes fue mayor para la especie de sombra *E. poeppigiana* con manejo convencional (ACE, MCE), seguido por *T. amazonia* con manejo alto convencional (ACT), contrario a esta dos especie se obtuvo con *A. idiopoda* donde el manejo orgánico (MOA) fue la de mayor liberación, pero considerada como la especie de sombra que libera más lento los nutrientes al sistema.
3. El potasio es el nutriente que presenta el mayor porcentaje de liberación seguido del magnesio quien presentó un mejor comportamiento de liberación con respecto al fósforo y nitrógeno mientras que calcio se mostró como el nutriente de más lenta liberación.
4. El potasio a pesar de que no mostró diferencias significativas entre tratamientos, fue el de más rápida liberación entre todos los nutrientes (corto plazo) y es el único nutriente que se puede explicar su comportamiento (tasa de liberación) a través de un modelo logarítmico. Los convencionales en *Erythrina* y *Terminalia* son los que presentan mayor tasa de liberación, mientras que para *Abarema* se obtiene primero en el orgánico.
5. El nitrógeno fue el único nutriente que mostró diferencias significativas entre tratamientos siendo la especie de sombra de *Erythrina* la que libera más rápido este nutriente. *Terminalia* y *Abarema* no difieren estadísticamente, pero se observó un mayor porcentaje liberado con el tratamiento MOA.
6. Al evaluar el aporte de nutrientes (kg/ha) al sistema se encontró diferencias significativas en todas las variables bajo estudio, siendo los nutrientes mayormente liberado N y K. *Erythrina* con diferentes manejos fue la que mayor aporte brindó al sistema, seguido por ACT y MOA, los tratamientos (MOT, MCT y MCA) figuran como los más lentos.
7. Se encontró diferencias significativas entre tratamientos en la descomposición del material vegetal de broza siendo la especie de sombra *Erythrina* en la que se presenta el mayor porcentaje de descomposición 69% y mayor tasa (k) de 1.26 por semana, mientras que *Terminalia* y *Abarema* presenta porcentaje de descomposición muy similar 52 % y 51% respectivamente, igual tendencia se

obtuvo al evaluar el 50% del material vegetal descompuesto. Se encontró que el mejor modelo que describe este comportamiento de descomposición es el logarítmico.

8. No se observó diferencias significativas entre tratamientos pero sí influencias de los árboles de sombra en la liberación de nutrientes siendo las especies leguminosas (*Erythrina* y *Abarema*) las que tuvieron mayor liberación que la especie maderable no leguminosa *Terminalia*.

9. La liberación porcentual de nutrientes tanto para residuo de poda y broza en 119 día tuvo la misma tendencia $K > Mg > P > N > Ca$.

10. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos al comparar la liberación de nutrientes (kg/ha) en 119 días que duro el ensayo, siendo la tendencia de liberación igual a la encontrada en su liberación porcentual.

3.6. Recomendaciones

1. Se deben estudiar los factores internos de la hoja (lignina, celulosa, taninos etc.) de *E. poeppigiana*, *T. amazonia*, *A. idiopoda*, bajo estos sistemas de manejo y correlacionarlo con otros factores (ambientales y edáficos) que influyen en la liberación, sobre todo en *Abarema* leguminosa maderable que existe poco estudio de esta especie y es la que presenta la más lenta liberación de nutrientes en término general.
2. Es importante repetir en el tiempo este estudio para definir si el comportamiento de liberación de nutrientes se mantiene sobre todos en los orgánicos en el cual se redujo la dosis de fertilizante (broza y gallinaza) durante el periodo en que se realizó el ensayo.
3. Para estudios posteriores se debe contar con tratamientos con especies mixtas para evaluar su comportamiento de liberación y condicionar la poda (total, parcial o sistemática) en el tiempo de mayor demanda de nutrientes requerido por el cultivo (floración o fructificación).
4. Realizar análisis de los contenidos de carbono a nivel foliar de las diferentes especies de sombra y observar la relación de C:N presente en el material debido a que estos son fuente de energía para los microorganismos que influyente en la tasa de liberación.
5. Estudios comparativos de tasa de liberación de nutrientes de árboles de sombra deben tomar en consideración el sistema de manejo que se utilice, así como el sistema de poda.

3.7. Literatura citada

- Alfaro A, R. 1997. Estudio de sistemas fertilización orgánica versus fertilización química en el cultivo de café (*Coffea arabica*) en la zona de Alajuela. *In* Simposio Latinoamericano de Caficultura (XVIII, 1997, San José, Costa Rica). Memoria. Comps. J. Echeverri; L. Zamora. San José Costa Rica. IICA/ Promecafé. p171-175.
- Bahuguna, V.K.; Negi, J.D S; Joshi, S.R.; Naithani, K.C. 1990. Leaf litter decomposition and nutrient release in *Shorea robusta* and *Eucalyptus camaldulensis* plantation. *Indian Forest* 116(1): 103-114.
- Basavaraju, T.B; Gururaja Rao, M.R. 2000. Tree- crop Interactions in Agroforestry Systems: A Brief review. *Indian Forest* 126(11): 1155-1164.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, C.R: Asociación Costarricense de la Ciencias del Suelo (ACCS) 157 p.
- CATIE. Laboratorio de análisis de suelo y tejido vegetal y agua. 1990. Análisis de nitrógeno en suelos: Método Semimicro Kjeldahl. Turrialba, Costa Rica. 3 p.
- _____. Laboratorio de análisis de suelo y tejido vegetal y agua. 1990. Procedimiento de Digestión de la muestra de tejido vegetal para determinación de cobre, zinc, manganeso, hierro, calcio, magnesio, potasio, fósforo y azufre. Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- Cody, M; McGill, W; Alegre, J; Gill, D; Kass, D; Rothwell, R. 2000. Patrones de liberación y distribución de nitrógeno en barbechos mejorados. *Agroforestería en las Américas*: 7(26): 65-67.
- Fassbender, H.W. 1993. Modelo Edafológico de Sistemas Agroforestales. 2da edición. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 530p. (Serie de Materiales de Enseñanza n° 29).
- García C, N.E. 2000. Manejo de suelo y de la materia orgánica en los agroecosistemas. *In* Martínez Cerdas, C; Ramírez Farias, L. comps., *Lombricultura y Agricultura Sustentable*. SAGA, INDER. México. p 117-123.
- Gliessman, S.R. 2002. Agroecología: Proceso ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 359 p.
- Guo, L.B; Sims, R.E. 1999. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 75: 133-140.

- Guo, L.B; Sims, R.E. 2002. Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand: internal effects. *Soil and Biochemistry* 34:913-922.
- Gutiérrez C, M. 2003. Disponibilidad 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. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 62p.
- Hartemink, A.E; O`Sullivan, J.N. 2001. Leaf litter decomposition of *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* and *Imperata cylindrica* in the humid lowland of Papua New Guinea. *Plant and Soil* 230:115-124.
- Hernández, R.; Ibarra, E. 1997. El marco conceptual de la sostenibilidad en la modernización de la caficultura en el entorno tecnológico del IICA/PROMECAFÉ. *In* Simposio Latinoamericano de caficultura (XVIII, 1997, San José, Costa Rica). Panel de caficultura sostenible. J. Echeverri; O. Mora; L. Zamora (eds). San José Costa Rica. IICA/PROMECAFÉ. p 27.
- InfoStat. 2004. InfoStat, versión 2004. Manual del usuario. Grupo InfoStat,FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas, Argentina.
- Jaimez, R.E; Franco, W. 1999. Producción de hojarasca, aporte en nutrientes y descomposición en sistemas agroforestales de cacao y frutales. *Agrotrópica* 11(1): 1-8.
- 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.
- Mafongoya, P.L; Giller,K.E; Palm,C.A. 1998. Decomposition and nitrogen release patterns of tree pruning and litter. *Agroforestry Systems* 38: 77-97.
- Martínez C, R. 2004. Manejo agroecológico del agroecosistema. *In* Encuentro Nacional de Agricultores Experimentadores e Investigadores en Producción Orgánica. (4to.2004. Turrialba, Costa Rica). La finca integral una propuesta local para un desarrollo global. Memoria. D. Polanco ; G. Soto . Eds. Turrialba, Costa Rica. p 13-22.
- Martins, A.; Azevedo, S. 1999. Dynamics of leaf litter structural compounds in *C. sativa* and *P. pinaster* Forest Ecosystems during the decomposition process: Interactions with soil organic matter and nutrient release. *Acta Horticulturae* N° 494: 161-164.
- McDaniel, P. 2001. Características de los Suelos del Ensayo de Sistemas con café. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2p.
- Melillo,J.M.; Aber,J.D.; Muratore, J.F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamic. *Ecology* 63(3):621-623.

- Montagnini, F; Jordan, C. 2002. Reciclaje de nutrientes. In Guariguata, M. R; Kattan, G.H. eds. Ecología y conservación de Bosques Neotropicales. Cartago, CR. LUR. p167-190.
- Munguía, R. 2003. Tasa de descomposición y liberación de nutrientes de hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y de hojas verde de *Erythrina poeppigiana* sola o en mezclas. Tesis MSc. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 82p.
- Muñoz A, C.Y. 2002. Disponibilidad de nutrimentos en tres compost. Tesis Mag. Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica. 67p.
- Muschler, R.G. 2000. Árboles en Cafetales. Turrialba, Costa Rica.; CATIE/GTZ. 139p. (Materiales de enseñanza n° 5).
- Nogueira, MAS; Pinheiro, NCG; Mollica, SV; Texeira, AM de. 2000. Nutrientes em compostos orgânicos de residuos vegetais e dejetos de suínos. Scientia Agrícola 57(1):185-189.
- 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 MSc. Turrialba, CATIE, Costa Rica. 75p.
- Palm, C.A; Sánchez, P.A. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of the leaves of three tropical legumes. Biotropica. 22(4): 330-338.
- Primavesi, A. 1984. Manejo ecológico del suelo. 5 ed. Buenos Aire. Argentina. El Ateneo. 499 p.
- Ribeiro, C; Madeira, M; Araújo, M.C. 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globules* grown under different water and nutrient regimes. Forest Ecology and Management 171: 31-41.
- Romero Lima, M del R. 2000. Agricultura orgánica: elaboración y aplicación de abonos orgánicos. In Martínez Cerdas, C; Ramírez Farias, L. comps., Lombricultura y Agricultura Sustentable. SAGA, INDER. México. p 25-134.
- Rubio G. E.; Figueroa S. B. 2000. Agricultura sostenible: Principio y práctica. In Martínez Cerdas, C; Ramírez Farias, L. comps., Lombricultura y Agricultura Sustentable. SAGA, INDER. México. p 81-114.
- Schroth, G. 2003. Decomposition and nutrient supplí from biomasa. Chapter 6. Trees, Crop and Soil Fertility. Edited by Schoroth, G and Sinclair, F.L. CABI. Publishing. 437p.
- Soto, G; Luna, P; Waggar, M; Smyth, T .J; Alvarado, A. 2002. Descomposición de residuos de cosecha y liberación de nutrimentos en plantaciones de palmito en Costa Rica. Agronomía Costarricense. 26(2): 43-51.
- Soil Science Society of America. 1987. Glossary of soil science terms. SSSA, Madison, WI.

- Szott, L.T.; Kass, D.C.L. 1994. Los fertilizantes en los sistemas agroforestales. *In* Krishnamurthy, L; Leos-Rodríguez, J.A. eds. Agroforestería en Desarrollo: Educación, Investigación y Extensión. Chapingo, México. p 83 -103.
- Uribe, H.A; Salazar, A.N. 1983. Influencia de la pulpa del café en la producción del cafeto. *Cenicafe* 34(2):44-58.
- Vaast, P; Snoeck, D. 1999. Hacia un manejo sostenible de la materia orgánica y de la fertilidad biológica de los suelos cafetaleros. *In* Bertrand, B; Rapidez, B. eds. Desafío de la caficultura en Centro América.. San José, C.R. IICA: PROMECAFE: CIRAD: IRD: CCCR. Francia. Editorial Agronómica. p139-169.
- Vanlauwe, B.; Diles, J.; Sanginga, N.; Merchx, R. 1997. Residue quality and decomposition: An unsteady relationship. *In* G. Cadish; K. E. Giller. Eds. Driven by nature. Plant litter quality and decomposition. CAB Internacional. p157-166.
- Zuluaga P, J.J. 2004. Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistema agroforestales de café con *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook en Costa Rica. Tesis M.Sc., CATIE, Costa Rica. 116p.

4. CONCLUSIONES GENERALES

1. La dinámica de nutrientes dentro del sistema de producción está afectado por el tipo de sombra que se utilice, siendo *Erythrina* la sombra que mayor cantidad de nutrientes moviliza en el sistema.
2. El manejo de los árboles de sombra determina el aporte de nutrientes que los mismos den al sistema:
3. *Erythrina* MO y MC aportaron muchos más nutrientes que el mismo *Erythrina* AC.
4. *Terminalia* AC aportó más nutrientes que el MC y MO.
5. No se puede concluir cuáles sistemas de manejo (MO, MC o AC) favorecen una mayor producción de biomasa en la poda ya que varió según la especie de sombra que se utilice.
6. La tasa de liberación de nutrientes de *Erythrina* fue mucho más rápida que en el caso de *Terminalia* y *Abarema*.
7. El tratamiento AC de *Erythrina* liberó los nutrientes más rápidamente que todos los demás tratamientos.
8. Para la mayoría de los nutrientes *Abarema* en 17 semanas no llegó a liberar el 50% de sus nutrientes.
9. Al determinar la cantidad de nutrientes aportados por la biomasa de las podas al sistema, se debe considerar las diferentes tasas de liberación de los distintos residuos de poda.

ANEXO 1

Contenido de nutrientes en ramas (poda 2 época lluviosa) de *E. poeppigiana*, *A. idiopoda*, *T. amazonia*, en diferentes sistemas de manejo (orgánico y convencional), en sistema agroforestal con café, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	%N	%P	%K	%Mg	%Ca
ACE	1.11	0.17	1.86	0.14	0.38
MOE	1.02	0.17	1.62	0.11	0.44
MCE	0.94	0.16	1.62	0.13	0.53
ACT	0.79	0.1	0.76	0.12	1
MOT	0.62	0.14	0.71	0.11	1.18
MCT	0.86	0.12	0.74	0.14	1.5
MOA	1.69	0.19	0.91	0.05	0.69
MCA	1.61	0.15	0.77	0.06	0.7

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico

ANEXO 2

Curva de mejor ajuste para describir el comportamiento de la tasa de descomposición de materia seca y liberación de nutrientes por tratamientos en un sistema de café orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje materia seca		Ecuación
			Remanente	Descompuesta	
ACE	1.26	0.73	15.44a	84.56	Logarítmica
MCE	-3.2	0.86	35.51a b	64.49	Lineal
MOT	-2.8	0.92	45.97 b c	54.03	Lineal
ACT	-2.66	0.93	47.15 b c	52.85	Lineal
MOE	1.19	0.8	48.87 b c	51.13	Logarítmica
MCT	1.17	0.88	55.32 b c	44.68	Logarítmica
MOA	1.13	0.84	57.78 b c	42.22	Logarítmica
MCA	1.12	0.8	62.27 c	37.73	Logarítmica
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje de nitrógeno		Ecuación
			Remanente	Liberado	
ACE	-0.4	0.93	10.98 a	89.02	Logarítmica
MCE	-0.29	0.95	19.57 a b	80.43	Logarítmica
MOT	-1.94	0.82	67.38 d	32.62	Lineal
ACT	-3.60,0.76,-0.04	0.99	63.8 c d	36.2	Cúbica
MOE	-0.26	0.94	24.83 a b c	75.17	Logarítmica
MCT			94.18 d	5.82	No ajusta
MOA	-0.1	0.79	57.13 b c d	42.87	Logarítmica
MCA			94.03 d	5.97	No ajusta
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje de potasio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
ACE	-0.87	0.95	0.95	99.05	Logarítmica
MCE	-0.74	0.77	1.56	98.44	Logarítmica
MOT	-0.44	0.81	7.8	92.2	Logarítmica
ACT	-0.48	0.82	5.65	94.35	Logarítmica
MOE	-0.65	0.85	2.5	97.5	Logarítmica
MCT	-0.5	0.85	6.8	93.2	Logarítmica
MOA	-0.41	0.81	12.71	87.29	Logarítmica
MCA	-0.37	0.93	14.62	85.38	Logarítmica
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje de calcio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
ACE	-0.19	0.82	31.79	68.21	Logarítmica
MCE					No ajusta
MOT	-2.01	0.74	73.77	26.23	Lineal
ACT	5.41 y -0.38	0.9	80.55	19.45	Cuadrática
MOE					No ajusta
MCT	1.34	0.65	76.33	23.67	Lineal
MOA	-8.16,1.27,-0.05	0.96	86.78	13.22	Cúbica
MCA					No ajusta

E: *Erythrina*, T: *Terminalia*, A: *Abarema*, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico.

ANEXO 2 (continuación)

Curva de mejor ajuste para describir el comportamiento de la tasa de descomposición de materia seca y liberación de nutrientes por tratamientos en un sistema de café orgánico y convencional, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje de fósforo		Ecuación
			Remanente	Liberado	
ACE	-0.39	0.96	11.47	88.53	Logarítmica
MCE	-0.27	0.76	21.83	78.17	Logarítmica
MOT	-2.93	0.97	48.16	51.84	Lineal
ACT	-2.42	0.83	55.34	44.66	Lineal
MOE	-0.25	0.9	27.75	72.25	Logarítmica
MCT	-2.12	0.92	62.57	37.43	Lineal
MOA	-7.98 y 0.42	0.9	85.96	14.04	Cuadrática
MCA					No ajusta
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje de magnesio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
ACE	-0.42	0.89	9.24	90.76	Logarítmica
MCE	-4.65	0.74	22.36	77.64	Lineal
MOT	-3.58	0.77	44.34	55.66	Lineal
ACT	-3.48	0.93	37.01	62.99	Lineal
MOE	-3.68	0.82	24.72	75.28	Lineal
MCT	-0.18	0.84	43.08	56.92	Logarítmica
MOA	-0.19	0.99	37.37	62.63	Logarítmica
MCA					No ajusta

E: Erythrina, T: Terminalia, A: Abarema, AC: Alto convencional, MC: Medio convencional, MO: Medio orgánico

ANEXO 3.

Curva de mejor ajuste para describir la tasa de liberación de materia seca y nutrientes en broza de café en sistema de manejo orgánico, Turrialba, Costa Rica.

Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje materia seca		Ecuación
			Remanente	Descompuesta	
MOE	1.26	0.81	31.14	68.86	Logarítmica
MOA	0.23	0.88	48.66	51.34	Logarítmica
MOT	1.24	0.91	48.01	51.99	Logarítmica
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje nitrógeno		Ecuación
			Remanente	Liberado	
MOE	-0.32	0.8	41.96	58.04	Logarítmica
MOA	-0.18	0.69	60.47	39.53	Logarítmica*
MOT	-0.23	0.71	61.6	38.4	Logarítmica*
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje Potasio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
MOE	-1.17	0.89	3.92	96.08	Logarítmica
MOA	-0.97	0.87	6.63	93.37	Logarítmica
MOT	-0.98	0.92	7.89	92.11	Logarítmica
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje calcio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
MOE			57.02	42.98	No ajusta
MOA			82.13	17.87	No ajusta
MOT	-7.30 y 0.35	0.94	82.83	17.17	Cuadrática
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje fósforo		Ecuación
			Remanente	Liberado	
MOE	-0.3	0.77	42.63	57.37	Logarítmica
MOA			58	42	No ajusta
MOT	-0.19	0.84	60.14	39.86	Logarítmica
Tratamiento	k-semana ⁻¹	Coeficiente r ²	Porcentaje magnesio		Ecuación
			Remanente	Liberado	
MOE	-0.3	0.89	38.75	61.25	Logarítmica
MOA	-0.17	0.79	57.88	42.12	Logarítmica
MOT	-0.2	0.93	58.77	41.29	Logarítmica

E: Erythrina, T: Terminalia, A: Abarema, MO: Medio orgánico