

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

**EVALUACIÓN DE MANEJO DEL PORÓ (*Erythrina Poeppigiana*) SOBRE LA
NODULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA UTILIZADO COMO ÁRBOL DE
SOMBRA, EN SISTEMAS CONVENCIONALES Y ORGÁNICOS DE CAFÉ EN
TURRIALBA, COSTA RICA**

POR:

HEIDY ELIZABETH ZUNIGA ESPINO

TESIS

**PRESENTADA A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
LICENCIADA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE**



CATACAMAS, OLANCHO

HONDURAS, C. A.

DICIEMBRE, 2012

EVALUACIÓN DEL MANEJO DEL PORÓ (*Erythrina Poeppigiana*) SOBRE LA NODULACIÓN Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA UTILIZADO COMO ÁRBOL DE SOMBRA, EN SISTEMAS CONVENCIONALES Y ORGÁNICOS DE CAFÉ EN TURRIALBA, COSTA RICA

POR:

HEIDY ELIZABETH ZUNIGA ESPINO

JOSÉ TRINIDAD REYES SANDOVAL, M. Sc.

Asesor Principal

TESIS PRESENTADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

LICENCIADA EN RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE

CATACAMAS

OLANCHO

DICIEMBRE, 2012

DEDICATORIA

A **Dios** todo poderoso
por brindarme la sabiduría necesaria,
para poder llegar al final de una de mis metas.

A MIS PADRES:
María Elena Espino Galo
Vicente Otilio Zuniga (Q.D.D.G.)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser el que iluminado mi vida, guiado mis pasos para poder conducirme por el camino del bien.

A mi madre María Elena Espino Galo ya que todos mis triunfos se los debo a ella, por ser mi mayor ejemplo a seguir, y enseñarme a no desmayar aun en las grandes adversidades que nos presente la vida por ser la persona que siempre ha estado ahí conmigo en los momentos difíciles, por ser una consejera y apoyarme en todas las decisiones tomadas en mi vida, por ser mi mayor inspiración, Te amo madre que Dios te bendiga siempre.

A mi querida abuela Victoria Galo (Q.D.D.G) por mostrarme el verdadero valor de la vida con sus consejos, y enseñanzas, demostrándome que si se quiere se puede y que nunca es tarde para reflexionar y comenzar de nuevo.

A mis hermanos Marcos y Ángel porque cada día que pasa doy gracias a Dios por sus vidas, y por ser esa razón y motivo que me impulsan a seguir adelante y luchar porque sé que lo mejor está por venir.

A Williams Jácome por ser una persona excepcional en mi vida, por demostrarme que el amor es paciente, por apoyarme en situaciones difíciles y por ser ese pilar fundamental en mi carrera.

A mis compañeras de habitación, (Gabriela y Delia) de casa (Alejandra, Irene, Ninoska, Adriana y Elsy) por brindarme su amistad y apoyo en momentos difíciles.

A la Universidad Nacional de Agricultura, nuestra alma mater por habernos brindado la oportunidad de poder realizarnos como futuros profesionales.

A mis asesores el **M Sc. Trinidad Reyes, M Sc. Wendy Castellanos y Ph. D. Elio Durón** por el apoyo brindado para la realización de mi tesis.

Al CATIE por haber permitido realizar mí trabajo de investigación y principalmente a **M Sc. Gabriela Soto** por todo su apoyo y colaboración y más que eso, por la amistad brindado en estos tres meses.

A Manrique Gonzales, Marianella Sanabria y Francisco Garro por su buena disposición y su colaboración en todo momento. Gracias.

Don Luis Romero, don Maynor y don Alfonso por su amistad y colaboración.

CONTENIDO

	Pág
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
CONTENIDO	iv
LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ANEXOS	x
RESUMEN.....	xiii
I INTRODUCCIÓN.....	1
II OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
III REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 La importancia de los sistemas agroforestales	4
3.2 Árboles de sombra en sistemas agroforestales con café.....	5
3.3 Calidad de suelos bajo sistemas agroforestales	6
3.4 Características de especies arbóreas utilizadas en el ensayo de SAF con café (CATIE).....	7
a) Cashá (<i>Chloroleucon eurycyclum</i>).....	7
b) <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró).....	7
3.5 Ventajas de asociar <i>Erythrina poeppigiana</i> con café.....	9
3.6 Manejo convencional del café.....	10
3.7 Manejo orgánico del café.....	11
3.8 Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes.....	12
3.9 Ciclaje de nutrientes	13
3.10 Fijación biológica de nitrógeno.....	15
3.11 Importancia de las interacciones suelo-planta.....	17
3.12 La Raíz	17
3.12.1 Raíces Finas.....	18

IV MATERIALES Y MÉTODOS	20
4.1 Descripción del área de estudio.....	20
4.1.1 Ubicación del ensayo	20
4.1.2 El suelo.....	20
4.1.3 Materiales y equipo	21
4.2 Descripción de los tratamientos, métodos de muestreo y análisis estadístico.....	22
4.2.1 Descripción de los tratamientos	22
4.2.2 Manejo del experimento.....	22
4.3 Método de muestreo	24
4.3.1 Época de muestreo	24
4.3.2 Estimación de la nodulación y su biomasa.....	24
4.3.3 Cuantificación de la biomasa en residuos de poda del dosel de sombra.....	26
4.3.4 Contenido y aporte de nutriente en la materia seca.....	28
4.3.5 Caracterización de raíces.....	29
4.4 Modelo Estadístico.....	30
4.5. Variables en estudio	30
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
5.1 Nodulación	31
5.2 Producción de biomasa en el estrato árboles de sombra	36
5.3 Aporte de nutrientes de la biomasa en residuos de poda del estrato árboles de sombra	40
a. Aporte de calcio	40
b. Aporte de magnesio.....	42
c. Aporte de potasio	44
d. Aporte de fósforo	46
e. Aporte de nitrógeno.....	48
5.4 Caracterización de raíces.....	50
VI CONCLUSIONES	53
VII RECOMENDACIONES.....	46
VIII BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS.....	65

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Resumen de tratamientos del ensayo de SAF de café en Turrialba, Costa Rica	22
Cuadro 2. Manejos y muestreo del estrato arbóreo de sombra en el ensayo de SAF con café en CATIE.....	26
Cuadro 3. Concentración (%) de nutrientes del estrato arbóreo de sombra en SAF café, Turrialba, Costa Rica.....	28
Cuadro 4. Nutrientes minerales en las fracciones cosechadas del árbol de <i>Erythrina poeppigiana</i> (poró).....	50
Cuadro 5. Promedio de la distribución espacial de raíces en árboles del estrato arbóreo de sombra, \pm desviación estándar bajo manejos convencionales y orgánicos, en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.	50
Cuadro 6. Promedio de la distribución espacial de raíces en árboles del estrato arbóreo de sombra, \pm desviación estándar bajo manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comparación de nódulos activos, muertos, total de raíces de <i>Erythrina poeppigiana</i> en el sistema de manejo orgánico de café en dos sitios contrastantes, Cartago, 2003. Las barras verticales representan el intervalo de confianza al 5 % de probabilidad. Valores seguidos de la misma letra no son significativos a 0.05.	16
Figura 2. Forma de muestreo en campo de nódulos y raíces en el ensayo de SAF con café CATIE, Turrialba, Costa Rica.	25
Figura 3. Muestreo en sistemas de la especie arbórea de sombra poró, solo o combinado (adaptado de Romero, 2006).	26
Figura 4. Muestreo de árboles de sombra con poda drástica (figura 4a), y con poda regulada (figura 4b).	27
Figura 5. Escáner utilizado para la digitalización de las raíces de las especies arbóreas....	29
Figura 6. Porcentaje de nódulos activos de <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en los manejos (AC, MC, MO, BO) bajo los sistemas evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	31
Figura 7. Porcentaje de nódulos activos de <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	32
Figura 8. Diámetro de raíces (cm ³) del estrato arbóreo de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados para la interacción (sistema * manejo), en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica.	33
Figura 9. Biomasa de nódulos activos en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en los manejos AC, MC, MO, BO bajo los sistemas evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	34
Figura 10. Biomasa de nódulos activos en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en los sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	35

Figura 11. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha ⁻¹) de hojas y peciolo en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) bajo los manejos AC, MC, MO, BO en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	37
Figura 12. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha ⁻¹) de hojas y peciolo en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	37
Figura 13. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha ⁻¹) de rama delgada (RD) y rama gruesa (RG) en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) bajo los manejos AC, MC, MO, BO en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	38
Figura 14. Promedios del aporte biomasa seca MS (kg ha ⁻¹) de rama pequeña y rama grande en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	39
Figura 15. Promedios de aportes totales (kg ha ⁻¹) de Ca en el estrato arbóreo de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica.	40
Figura 16. Promedios del aporte de Ca (kg ha ⁻¹) en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	41
Figura 17. Promedios de aporte total Mg (kg ha ⁻¹) en el estrato arbóreo en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica.	42
Figura 18. Promedios del aporte de Mg (kg ha ⁻¹) en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	43
Figura 19. Promedios de aporte total K (kg ha ⁻¹) estrato arbóreo en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica.	44
Figura 20. Promedios del aporte total de K (kg ha ⁻¹) en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	45
Figura 21. Promedios de aportes totales (kg ha ⁻¹) de P en el estrato árboles de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica.	46

Figura 22. Promedios aporte P (kg ha^{-1}) en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	47
Figura 23. Promedios de aportes totales (kg ha^{-1}) de N en el estrato árboles de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica.	48
Figura 24. Promedios del aporte MS (kg ha^{-1}) de N en <i>Erythrina poeppigiana</i> (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	49
Figura 25. Diámetro de raíces (cm^3) del estrato arbóreo de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados para la interacción (sistema * manejo), en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica.	52

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Promedios de biomasa (MS) del estrato árboles de sombra en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	66
Anexo 2. Promedios de biomasa (MS) del estrato árboles de sombra en dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	66
Anexo 3. Medias de los componentes de la variable nódulos en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	66
Anexo 4. Medias de los componentes de la variable biomasa en residuos de poda (kg ha^{-1}) en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	67
Anexo 5. Medias de los componentes de la variable aporte de nutrientes en residuos de poda (kg ha^{-1}) en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	67
Anexo 6. ANAVA para el componente % nódulos activo bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica.	67
Anexo 7. ANAVA para el componente biomasa de nódulos activos en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.	68
Anexo 8. ANAVA para el componente biomasa seca hojas (kg ha^{-1}) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	68
Anexo 9. ANAVA para el componente biomasa seca de peciolo (kg ha^{-1}) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	68

Anexo 10. ANAVA para el componente biomasa seca de rama delgada (RD) (kg ha^{-1}) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	69
Anexo 11. ANAVA para el componente biomasa seca de rama gruesa (RG) (kg ha^{-1}) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	69
Anexo 12. ANAVA para aportes totales (kg ha^{-1}) de Ca bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	69
Anexo 13. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de Mg bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. ..	70
Anexo 14. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de K en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. ..	70
Anexo 15. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de P bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. ..	70
Anexo 16. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de N bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. ..	71
Anexo 17. ANAVA para el componente longitud (cm) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.....	71
Anexo 18. ANAVA para el componente área (cm^2) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	71
Anexo 19. ANAVA para el diámetro (mm) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	72
Anexo 20. ANAVA para el volumen (cm^3) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.	72
Anexo 21. Muestreo de las variable biomasa en residuos de poda para los componentes hojas (figura a), peciolo (figura a), rama delgada y rama gruesa (figura b), bajo los manejos AC, MC, MO y BO en los dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Peso seco de los componentes de la variable aporte de biomasa (figura c), horno para el secado de hojas, peciolo, RP y RG (figura d).....	73

Anexo 22. Nódulos <i>Erythrina poeppigiana</i> encontrados en el muestreo (figura a), nódulos seco (figura b) después de haber sido extraídos del horno, balanza electrónica (g) para el pesado de nódulos verdes (figura c).	74
Anexo 23. Herramientas utilizadas en laboratorio y el campo balanza (figura a) y barreno (figura b) en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.....	75
Anexo 24. Sistemas de sombra (tratamientos) poró-cashá (figura a) y poró (figura b) evaluados en el ensayo de SAF.	75

Zuniga Espino, H.E. 2012. Evaluación del manejo del poró (*Erythrina poeppigiana*) sobre la nodulación y producción de biomasa utilizado como árbol de sombra, en sistemas convencionales y orgánicos de café en Turrialba, Costa Rica. Tesis Lic. En Recursos Naturales y Ambiente. 75 p.

RESUMEN

Se evaluó *Erythrina poeppigiana* (poró) en dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica (600 msnm y 2600 mm de precipitación anual), evaluando los manejos alto convencional (AC), medio convencional (MC), medio orgánico (MO) y bajo orgánico (BO), en monosombra (poró solo) y en asocio (cashá-poró), en un diseño con arreglo de parcelas divididas en bloques al azar, con 8 tratamientos y tres repeticiones. Evaluando las variables nodulación, producción de biomasa del estrato arbóreo, aporte de nutrientes en residuos de poda y caracterización de raíces. En la nodulación se midió el porcentaje de nódulos activos, el manejo bajo orgánico (BO) 58.84% representa el mayor aporte total de nódulos activos en árboles de poró. La biomasa del árbol de poró se reportó en kg ha^{-1} en residuos de poda, midiendo los componentes hojas, peciolo, rama delgada y rama grande. Los manejos que mayor biomasa seca total (BS) aportan son BO 28.73% $1019.94 \text{ kg ha}^{-1}$ y AC 25.66% con 911.0 kg ha^{-1} , los componentes que presentan los mayores aportes de biomasa seca en residuos de poda son rama grande y hojas en los dos sistemas de sombra en estudio. Los nutrientes se midieron con las concentraciones de Romero (2006), para los componentes hojas, rama delgada y rama gruesa obteniendo tendencias donde se encontró mayor producción de nitrógeno luego potasio y en menores cantidades calcio, fósforo y magnesio en todos los manejos bajo los dos sistemas de sombra. La caracterización de las raíces se hizo de acuerdo a los componentes longitud (cm), área (cm^2), diámetro (mm) y volumen (cm^3). 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. En síntesis la especie arbórea de servicio *Erythrina poeppigiana* (poró) es la más idónea para ser utilizada en sistemas agroforestales con café.

Palabras claves: Café, sistemas agroforestales, *Erythrina poeppigiana* (poró), manejo, biomasa, nutrientes, raíces, sistemas, convencional, orgánico.

I INTRODUCCIÓN

En los últimos años la rentabilidad de los cafetales caracterizados por cultivar variedades altamente productivas y que requieren gran cantidad de insumos, bajo poco o ninguna sombra, dejó de ser la más alta en comparación con cafetales menos tecnificados. Asimismo el conocimiento y valoración del impacto ambiental que se genera con la agricultura tecnificada (contaminación del agua, erosión del suelo y residuos de pesticidas), considerablemente (Muschler 2000)

De esta forma, la mayoría de propuestas de sistemas de manejo de café para responder a estos problemas ecológicos y económicos, poseen un elemento en común y es la incorporación de árboles en el sistema de producción, ya que en un sistema agroforestal se logran combinar muchos beneficios de un sistema agrícola con los de un sistema forestal y además se propicia una caficultura sostenible (Muschler 2000). Particularmente, los agroecosistemas de café (*Coffea* spp.) con alta diversidad vegetal, son por lo general, menos productivos pero ciertamente más estables y sostenibles que los monocultivos, por el rol benéfico de los árboles de sombra para conservar la materia orgánica del suelo (MOS), elemento clave para mitigar numerosos problemas ambientales que enfrenta la productividad de los cultivos tropicales, pues ésta afecta sustancialmente la fertilidad biológica, química y física del suelo; de allí la importancia de implementar prácticas que favorezcan su conservación y que incrementen la eficiencia de los procesos biológicos como son la fijación biológica de nitrógeno y la simbiosis micorrítica para reducir el uso de fertilizantes y otros agroquímicos, y por ende incrementar las utilidades de los productores (Vaast, Snoeck 1999)

Las consecuencias ambientales negativas y la fragilidad económica del monocultivo del café, han hecho dudar sobre su pertinencia socioeconómica, lo que ha reenfocado la

atención hacia el papel benéfico de los árboles de sombra y hacia sistemas basados en la asociación permanente para mejorar el ciclaje y la disponibilidad de nutrientes, reducir sus pérdidas, disminuir la degradación del medio ambiente e incrementar la rentabilidad para los productores (Beer *et al.* 1998). El reciclaje de grandes cantidades de biomasa, ricas en nutrientes, es importante para suelos con bajos contenidos de materia orgánica, siendo los árboles de sombra claves para el mantenimiento de la productividad, de allí que la más importante característica de las especies arbóreas (excluyendo productos comerciales) para su asocio con café, es la alta productividad de biomasa bajo regímenes intensivos de podas y no la fijación de N (Beer 1988)

La fijación biológica de N de las plantas leguminosas es el principal mecanismo de aporte de N en los ecosistemas naturales y es muy importante en la agricultura de poco insumo en el trópico. La fijación biológica de N puede ser considerada como una manera más efectiva, menos cara y no contaminante, para mejorar la fertilidad del suelo comparada con otras vías (como la fertilización química), las cuales presentan altos niveles de contaminación con sales nitrogenadas (Romero 2006). En nuestro estado de conocimiento actual, la simbiosis Rhizobium-leguminosa (nodulación en las raíces de leguminosas) es superior a los otros sistemas de fijación de N por lo que demandan un gran interés como área de futura investigación (Baca *et al.* 2000)

Las especies arbóreas utilizadas como sombra en SAF han sido el punto de partida en diversos estudios bajo sistemas de producción de café convencional y orgánico, para identificar cual es la más indicada para ser utilizado por los productores, buscando siempre la sostenibilidad en sistemas productivos de café. De allí la importancia de estudiar el comportamiento de especies leguminosas como ser *Erythrina poeppigiana* (poró), en SAF con café.

II OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluación de la nodulación, producción de biomasa, aporte de nutrientes en residuos de poda y caracterización de las raíces de *Erythrina poeppigiana* (poró), en dos estratos de sombra en (monosombra y asocio) bajo los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica.

2.2 Objetivos específicos

Comparar la nodulación de las raíces de *Erythrina poeppigiana* en los manejos alto convencional (AC), medio convencional (MC), medio orgánico (MO) y bajo orgánico (>BO) en dos sistemas de sombra.

Evaluar la producción de biomasa y aporte de nutrientes de *Erythrina poeppigiana* bajo los manejos alto convencional (AC), medio convencional (MC), medio orgánico (MO) y bajo orgánico (BO) en dos sistemas de sombra.

Identificar la distribución espacial de las raíces de poró, bajo los sistemas convencional y orgánico en dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

III REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 La importancia de los sistemas agroforestales

La promoción y el estudio formal de los SAF, como un sistema de uso de la tierra practicado desde tiempos inmemorables, tanto en el viejo como en el nuevo mundo, comenzaron a finales de los años 70 (Steppler, Nair 1987). Las bondades y servicios que estos sistemas prestan a los productores, aumentado a la creciente preocupación internacional sobre temas ambientales, hace reconocer que los SAF poseen muchas ventajas sobre los monocultivos para responder a la demanda de una agricultura multifuncional, proveyendo de servicios medioambientales importantes, valores estéticos, zonas de amortiguamiento en áreas protegidas y áreas de recreación para turismo agroecológico (Beer *et al.* 2003)

Los sistemas agroforestales, son formas de uso y manejo de los recursos naturales en los cuales, especies leñosas (árboles y arbustos), son utilizados en asociación deliberada con cultivos agrícolas y con animales, en un arreglo espacial (topológico) o cronológico (en el tiempo) en rotación con ambos; existen interacciones ecológicas y económicas entre los árboles y los otros componentes de manera simultánea o temporal, de manera secuencial, que son compatibles con las condiciones socioculturales para mejorar las condiciones de vida de la región.

Con esto se pretende controlar la agricultura migratoria, aumentar el nivel de materia orgánica en el suelo, diversificar la producción, fijar nitrógeno atmosférico, reciclar nutrientes, modificar y mejorar el microclima y optimizar la producción, respetando el principio de sostenibilidad. De este modo un sistema agroforestal es un sistema dinámico,

ya que las condiciones de los componentes y sus interacciones cambian en el transcurso del tiempo.

3.2 Árboles de sombra en sistemas agroforestales con café

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

Los efectos benéficos de los árboles sobre la fertilidad de los suelos pueden influir tanto en una mejora en la estructura del suelo como aumentos en la disponibilidad de nutrimentos. Estos efectos de los árboles sobre los suelos son consecuencia de la materia orgánica obtenida por medio de: 1) la hojarasca 2) las podas, 3) y la descomposición de raíces (Montagnini, 1992). Además, las especies arbóreas pueden influir sobre el p^H , cationes, materia orgánica, contenido y disponibilidad de nitrógeno y fósforo del suelo. En América Central, la dominancia de áreas de café bajo sombra en comparación de café a pleno sol puede ilustrar un ejemplo de un sistema agroforestal exitoso que puede ser sostenible a través del tiempo y, a la vez, generar ingresos y trabajo por los productos múltiples como café, madera, frutos y leña.

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

3.3 Calidad de suelos bajo sistemas agroforestales

Dentro de los sistemas agroforestales el componente arbóreo influye en variables físicas, biológicas, ambientales, las del sistema y las químicas, entre de las variables físicas están; densidad, porosidad, humedad y compactación; entre variables biológicas las lombrices e invertebrados; entre las variables ambientales están la regulación del microclima del cultivo que evita el desecamiento y sobrecalentamiento del suelo; entre las variables del sistema están la producción, la calidad y la cantidad de la hojarasca (Schroth *et al.* 2001, Lavelle *et al.* 2003) y entre variables químicas está el incremento de la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, y la disponibilidad de N, P y K por la adición de hojarasca, raíces y tallos (Sadeghian *et al.* 1998) que a la vez afecta las variables microbianas incrementando la población de hongos que son los encargados de descomponer estos residuos (Julcaotiniiano *et al.* 2002)

En su gran mayoría las producciones de café se encuentran en zonas de ladera por lo tanto el manejo y la conservación de suelos debe ser lo más eficiente posible, una de las prácticas más comunes para ello es la siembra de árboles de sombrío. Los árboles de sombra producen abundante hojarasca que protege al suelo del impacto de la lluvia y favorece la entrada del agua a través del perfil, disminuyendo el agua de escorrentía y por ende la erosión Gómez, (1992). Un ejemplo de esto es lo encontrado por Uribe (1971) donde en café al sol desyerbado con azadón, la pérdida por erosión del suelo es de 4.882 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en café con sombra es de 2.170 kg ha⁻¹ año⁻¹. La cobertura arbórea puede proveer al sistema agroforestal de 5 a 20 toneladas de hojarasca y ramas dependiendo de la especie usada (Heuveldop *et al.* 1985)

Según Guharay *et al.* (2001), la hojarasca es la base de nutrientes y energía de los organismos del suelo, afirma que la sombra protege a los microorganismos de altas temperaturas y cambios bruscos en humedad. Se ha encontrado que los sistemas agroforestales tienen mayor cantidad de hongos micorrízicos arbusculares comparados con sistemas de café en monocultivo, además de que su alta incidencia puede cambiar la

dinámica del ciclo del fósforo en el suelo haciendo más disponible este nutriente para las plantas (Cardoso *et al.* 2003)

En cuanto a la dinámica de nutrientes en sistemas agroforestales Montenegro (2005) encontró que para el caso de *Erythrina poeppigiana* sembrada a una densidad de 500 árboles por hectárea y dos podas al año puede aportar al sistema 12417 kg ha⁻¹ de biomasa (hojas y ramas) que contribuyen con 286,19 kg ha⁻¹ de N, 183,87 kg ha⁻¹ de K, 122,03 kg ha⁻¹ de Ca, 42,80 kg ha⁻¹ de Mg, y 24,35 kg ha⁻¹ de P.

3.4 Características de especies arbóreas utilizadas en el ensayo de SAF con café (CATIE)

a) Cashá (*Chloroleucon eurycyclum*)

Las especies Se encuentra en México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, en bosques tropicales húmedos, bosques nublados, semidecíduos; en altitudes desde el nivel del mar hasta 1500 msnm (Cordero *et al.* 2003). Es una especie leguminosa fijadora de nitrógeno, que presenta características particulares como por ejemplo: sus raíces poseen propiedades insecticidas, el follaje denso con copa alta y abierta, color verde intenso y alto contenido de N. En cafetales es compatible con otros árboles de copas 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. Esta especie tiene un alto valor comercial y por ende económico, debido a los diferentes usos de su madera y como leña (Cordero *et al.* 2003)

b) *Erythrina poeppigiana* (Poró)

Esta especie es una leguminosa que pertenece a la familia Papilionaceae, cuyos nombres comunes son poró gigante, poró, poró extranjero, poro de sombra, pito, entre otros.

Se presenta en bosques húmedos de rivera y de tierras altas de las cuencas del Amazonas y Orinoco, y en regiones limítrofes del trópico de América del Sur (Cordero *et al.* 2003)

También incluye los bosques húmedos costeros de Colombia y Ecuador, sin embargo, esta especie está naturalizada en la mayor parte de América Central, mostrando alta regeneración natural. Estas introducciones ocurrieron ya en el siglo XVIII en Costa Rica, Guatemala, Honduras, Colombia, y Cuba. Se encuentra en altitudes de 600 hasta 1700 m, con temperatura promedio anual de 18 a 28°C y precipitación anual de 1000 a 1300 mm (Cordero *et al.* 2003)

Es una especie importante en sistemas agroforestales de todo tipo, en particular para combinar con cultivos perennes. La especie es fijadora de nitrógeno y se conoce que nodula abundantemente. Produce grandes cantidades de hojarasca rica en nitrógeno (4.1-4.9% nitrógeno), de aquí el valor de la especie en conservar y mejorar el suelo y contribuir a rendimientos elevados y sostenibles de los cultivos asociados. Como forraje su calidad es regular aunque puede mejorar la producción de leche en vacas. Las hojas tienen un alto contenido en proteína y tienen buena digestibilidad. La madera es blanda y ligera (0.25), y no es apta para la mayoría de usos. No proporciona leña de calidad por su bajo poder calorífico y cuando se usa como tal es principalmente por la falta de alternativas, más que por ser preferida. Contiene alcaloides que actúan como relajantes de los músculos, pudiendo llegar a causar parálisis. En Ecuador, la corteza se muele en una pasta que se aplica sobre lesiones y torceduras. También tiene propiedades insecticidas. Es valorada en la zona cafetalera como ornamental, por su hermosa floración.

En América Central es una de las especies más importantes para sombra en café, cacao y plantaciones de pimienta. También es valorada por la producción de abono verde y mulch, su capacidad de fijar nitrógeno y su gran tolerancia a podas frecuentes durante largo tiempo que permite ajustar la sombra del cultivo principal.

Es un árbol de tallo múltiple, a menudo espinoso y de copa moderadamente extendida, que alcanza alturas de hasta 20-30 m y diámetros de hasta 1.2 m (o incluso hasta 2m), el tronco en árboles grandes tiende a no presentar ramas en los 10-20 primeros m (Cordero *et al.* 2003)

En las plantaciones de café proporciona una sombra homogénea y fácilmente manejable, mejora el crecimiento y producción de café y reduce la cantidad de malezas. Análisis económicos de esta especie en plantaciones de café en Costa Rica mostraron tasas de retorno mayores del 30%. Estas tasas fueron significativamente mayores comparadas con café sin árboles, además de reducir el riesgo en las fluctuaciones del precio del café y la necesidad de fertilizantes químicos. También ofrece oportunidades importantes en la producción de café y cacao orgánico, dando apertura a nuevos mercados.

3.5 Ventajas de asociar *Erythrina poeppigiana* con café

Ha sido usado en muchas partes y particularmente en Costa Rica como sombra en cafetales, cuyas características la hacen muy versátil por su multiplicidad de usos: Sombra para cultivos asociados, abono orgánico, fijación biológica de N, producción de forraje, etc., (Russo 1983)

Erythrina poeppigiana, por su abundante producción de follaje rico en N es una especie apta para utilizarse como: Abono verde en sistemas agroforestales con café (Nygren 1995). En el caso del café; la incorporación de residuos de poda de los árboles de sombra, precede a la floración y la fructificación del cultivo. Esta sincronización es importante cuando no se fertiliza artificialmente, debido a que permite la liberación de nutrientes cerca de las raíces del café, las cuales son muy superficiales, justamente en el momento que podría demandar nutrientes. Además en el caso del *Coffea arabica* y *Theobroma cacao* bajo sombra la transferencia de nutrientes por la hojarasca y la rápida descomposición compensa ampliamente la “exportación” por cosecha, constituyendo así un “fertilizante natural” (Herrera *et al.* 1985)

3.6 Manejo convencional del café

El manejo convencional se basa en el uso de agroquímicos inorgánicos, tales como insecticidas, fertilizantes, herbicidas, entre otros, para lograr altas producciones por unidad de área. Frecuentemente este sistema de manejo viene asociado a la presencia de un dosel de sombra monoespecífica o de plantaciones a pleno sol. El uso excesivo de insumos como herbicidas, pesticidas y fertilizantes sintéticos conlleva a un bajo nivel de calidad ecológica de los agroecosistemas, debido a que generan contaminación del suelo, agua, animales, resistencia de plagas, erosión de suelos e intoxicación humana (Boyce *et al.* 1993)

La agricultura en su afán de suplir de alimento a la creciente población mundial, ha incrementado sus rendimientos gracias a los avances científicos e innovaciones tecnológicas como: el uso de nuevas variedades, fertilizantes, riego y plaguicidas para el control de plagas y enfermedades. Esta nueva agricultura se basa en: labranza intensiva del suelo para crear condiciones propicias para las raíces de las plantas, monocultivos para obtener mayores rendimientos por hectárea, riego para estabilizar la estacionalidad de la producción, la aplicación de fertilizantes inorgánicos los cuales son rápidamente absorbidos por la planta, el control químico contra plagas y enfermedades y por último la manipulación genética de las plantas para obtener mejores cosechas y protección contra condiciones adversas de clima y plagas. Todas estas prácticas favorecen la productividad a corto plazo comprometiendo así la de largo plazo. Los recursos suelo, agua y diversidad genética han sido sobre utilizados y los resultados no se han hecho esperar: suelos salinizados por el exceso de riego, compactación por exceso de labranza, pérdida de la capacidad de permeabilidad de los suelos e incremento de escorrentía, contaminación de los suelos y aguas por plaguicidas, reducción de la calidad estructural del suelo por pérdida de materia orgánica y pérdida de la fertilidad e incremento de la erosión así como erosión genética por el uso de monocultivos (Gliessman 2002)

3.7 Manejo orgánico del café

La caficultura orgánica, se fundamenta en la conservación y mejoramiento de las condiciones ecológicas del agroecosistema, tal como la conservación de los recursos suelo, agua y biodiversidad, para lograr la sostenibilidad de la producción a largo plazo (Boyce *et al.* 1993, Borin y Pimentel 2003, Sosa *et al.* 2004)

El café orgánico viene a ser la respuesta ante los problemas cada vez mayores de contaminación de fuentes de agua por el uso de abonos nitrogenados, a la disminución de la biodiversidad del cafetal y a las necesidades económicas de los pequeños y medianos productores quienes habían sido mayormente afectados por la crisis mundial de precios del café.

En la caficultura orgánica, el principal recurso de producción es el suelo y por lo tanto, los programas de manejo van orientados a su conservación y mejoramiento, así como al rejuvenecimiento del cafetal, y el componente arbóreo para la sombra, protegiendo a las plantas contra el exceso de calor, la mejora y mantenimiento de la fertilidad del suelo (Samayoa 1999). Bajo este sistema se tiene conciencia que las enfermedades del café están estrechamente ligadas al estado nutricional de la planta y que no son solamente un problema de origen patológico (Monge 1999)

Producir café orgánico no es ni más barato, ni más fácil, pero con un adecuado programa de manejo, en un mediano plazo, no menor a la cantidad de años que conlleve el estabilizar el agroecosistema, se puede llegar a igualar los costos de producción o incluso a disminuirlos. Además los premios en los precios del café orgánico, los cuales dependen de factores tales como la demanda, la calidad de taza y la habilidad negociadora del comercializador, favorecen la rentabilidad y sostenibilidad del sistema orgánico de producción.

Las principales metas de los sistemas orgánicos de producción encierran: Eliminar o reducir la contaminación proveniente del uso de insumos sintéticos inorgánicos, utilizando recursos renovables en un sistema cerrado que busca mantener el reciclaje de nutrientes en el sistema, la diversidad genética, proveer hábitat para animales silvestres, tomando en cuenta el impacto socioeconómico del agroecosistema (Sosa *et al.* 2004), por lo tanto el sistema orgánico se caracteriza por el uso de insumos producidos muchas veces con materiales de la propia finca, y por el uso intensivo de mano de obra en el manejo del cafetal (Boyce *et al.* 1993, Borin y Pimentel, 2003, Sosa *et al.* 2004)

3.8 Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes

En SAF de café, las frecuencias de poda del estrato arbóreo afectan la acumulación de biomasa y nutrientes que retornan al suelo; si las podas por año aumentan sucesivamente, decrece la acumulación de biomasa producida en la parte aérea, así como la caída natural de hojarasca y por ende, los nutrientes contenidos en esta (Ruso y Budowski 1986). Otro factor que afecta el aporte y ciclo de nutrientes es el tipo de asociación del estrato arbóreo y su densidad de plantación, Glover y Beer, (1986) encontraron diferencias en los aportes de biomasa y nutrientes, al comparar SAF de café en asocio con poró y poró más laurel (*Cordia alliodora*)

Montenegro (2005), al evaluar la producción de biomasa y aporte de nutrientes en residuos de poda de árboles de sombra en tres SAF de café, bajo tres niveles de manejo, concluyó que el sistema de manejo y el tipo de sombra determinan el aporte y la tasa de liberación de nutrientes; encontró que los tratamientos con mayor aporte de biomasa (MS) y nutrientes fueron aquellos con sombra de poró bajo manejo medio convencional (MC) (11790 kg ha⁻¹ MS, 144 kg ha⁻¹ de N y 101 kg ha⁻¹ de K) y bajo manejo orgánico intensivo (MO) (10072 kg ha⁻¹ MS, 113 kg ha⁻¹ de N, y 90,8 kg ha⁻¹ de K). Russo y Budowski (1986), evaluando tres frecuencias de poda en la producción de biomasa de poró en un SAF de café, encontraron que la producción de biomasa se ve disminuida conforme se aumenta la frecuencia de poda al año. Los valores de producción de biomasa (MS) para una poda al año fueron 18470 kg ha⁻¹ año⁻¹, para dos podas al año 11800 kg ha⁻¹ año⁻¹ y para tres

podas al año 7850 kg ha⁻¹ año⁻¹. El aporte total de N fue similar para las dos primeras frecuencias de poda, pero para tres podas al año fue muy baja (de 237,2 kg ha⁻¹ año⁻¹ a 173,4 kg ha⁻¹ año⁻¹)

Berninger y Salas (2003) recomiendan ciclos de poda espaciados para propiciar la sostenibilidad de la producción de biomasa del sistema. Glover y Beer (1986), evaluando la producción de nutrientes de dos SAF de café, uno bajo sombra de poró y otro bajo laurel más poró, encontraron que los nutrientes que aportaron estos sistemas alcanzaron los valores de fertilización recomendados por el ICAFE para esa época. Cardona y Sadeghian (2005) encontraron valores similares de biomasa de hojarasca en cafetales bajo sombra y a pleno sol, en dos localidades de Colombia, con condiciones ambientales contrastantes; la biomasa en los cafetales bajo sombra fue de 2200 y 1900 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente, y la biomasa en los cafetales a pleno sol fue de 1100 y 900 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente. No encontraron diferencias significativas en los aportes de nutrientes entre localidades para los cafetales bajo sombra; no obstante, los aportes de P y Mg si fueron significativos entre localidades para los cafetales a pleno sol. La biomasa y nutrientes contenidos en el estrato herbáceo dependen, entre otros factores, del tipo de asociación en el SAF, Jiménez y Martínez (1979), evaluando la producción de materia orgánica en SAF de café con diferentes estructuras, encontraron que la biomasa en el estrato herbáceo fue inferior en SAF con sombra diversa (37,5 kg ha⁻¹), que la biomasa acumulada en SAF con dosel de una sola especie de sombra (1142 kg ha⁻¹) y que la biomasa acumulada a pleno sol (1851 kg ha⁻¹)

3.9 Ciclaje de nutrientes

Existen 16 nutrimentos que se consideran esenciales para el desarrollo vegetal, los que se utilizan en mayor cantidad son C, H, O, que se obtienen principalmente del agua y el aire. Como elementos mayores, la planta adsorbe del suelo N y K, aunque el N también puede ser fijado biológicamente de la atmósfera por algunas bacterias que se asocian a las plantas, el P generalmente se incluye dentro de este grupo porque, aunque se aplica en grandes cantidades, el consumo de este por la planta es muy ineficiente. Como elementos medios

se consideran el Ca, Mg y S y, como elementos esenciales, pero que se requieren en pequeñas cantidades (oligoelementos o micronutrientes) están el Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni. Otros elementos (no esenciales), pero que en algunos casos pueden ser muy beneficiosos a las plantas son el Co, Si, Na, Ga y Va. También existen elementos que resultan tóxicos a las plantas porque dañan sus tejidos, como Al, Pb y Hg (Bertsch, 1998).

Cada nutriente tiene formas químicas particulares de adsorción, algunas catiónicas (N, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu y Fe) y otras aniónicas (N, P, S, B, Mo y Cl). Es importante favorecer la presencia de dichas formas en el suelo, para propiciar una buena adsorción, y para que esta ocurra, además de los mecanismos fisiológicos de la membrana que interviene en la introducción de los nutrientes del suelo a la raíz, son importantes otros procesos relacionados con la forma en que ellos se acercan desde los diferentes puntos del suelo (Bertsch 1998), de manera que los nutrientes sean provistos en sincronía con la necesidad de los cultivos (Palm, 1995)

La mayor parte de los aspectos del ciclo de nutrientes es afectada directamente por la selección de las especies de sombra, que difieren en la producción de biomasa aérea, producción de raíces finas y porcentaje de descomposición de su biomasa (Palm 1995). El aporte de biomasa y nutrientes (especialmente hojas y ramas) depende, además de las especies involucradas, de las condiciones climáticas reinantes (Fassbender 1992). El manejo de sombra (especialmente poda) tiene un efecto crítico en el ciclo de nutrientes, ayuda al mantenimiento del microclima de la superficie del suelo de los cultivos y provee una herramienta para manipular el tiempo y la cantidad de nutrientes transferidos del árbol al suelo (Beer *et al.* 1998)

La disponibilidad de nutrientes para las plantas, está determinada por la proporción en que los nutrientes circulan dentro del sistema y la cantidad de insumos que éste recibe (Lampkin 2001). La composición bioquímica de los restos vegetales varía dentro de los límites, según su edad y funciones del órgano vegetal analizado. Los tejidos verdes son más ricos en carbohidratos y proteínas, mientras que los tejidos leñosos presentan mayores

contenidos en compuestos fenólicos (ligninas) y celulosas (Fassbender 1992). Son los contenidos de polifenoles y ligninas factores adicionales que influyen la liberación de los nutrientes de la hojarasca y otros residuos vegetales, ya que ambos disminuyen la calidad de los materiales vegetales (Palm 1995)

Particularmente, los árboles de especies leguminosas de rápido crecimiento pueden acelerar la restauración de las reservas de N, P, y K en la capa superior del suelo, donde pueden ser aprovechados por el cultivo; sin embargo, no siempre reponen completamente las reservas de Ca y Mg (Szott y Palm 1996). Las plantas pueden tomar directamente algunos de estos componentes, tal vez por sus asociaciones con micorrizas, activándose en ellas procesos fisiológicos o bioquímicos. Como consecuencia de esto, el crecimiento puede verse estimulado o regulado, o puede incluso ayudar a la resistencia de la planta frente a ataques de patógenos. Las sustancias húmicas actúan como intercambiadores de iones que, hasta cierto punto, regulan la nutrición de la planta. Los grupos de carboxilos que estas sustancias contienen se disocian para proporcionar cargas negativas, y generalmente, tienen el doble de carga que los minerales de la arcilla de manera que, aún una pequeña proporción de materia orgánica, podría contribuir significativamente a la capacidad de intercambio catiónico (Lampkin 2001)

3.10 Fijación biológica de nitrógeno

La fijación biológica puede ser simbiótica o no simbiótica. La fijación simbiótica de N se refiere al trabajo de bacterias que fijan N mientras crecen en asociación con una planta huésped. Esta asociación beneficia tanto a los microorganismos como a la planta huésped. El ejemplo más conocido es la asociación entre la bacteria *Rhizobium* y las raíces de las leguminosas (Bertsch 1995). Estas bacterias forman nódulos en las raíces, en los cuales las bacterias fijan el N de la atmósfera y lo hacen disponible para las leguminosas. Las leguminosas entregan carbohidratos, los cuales proveen la energía necesaria para que las bacterias fijen N. Las prácticas de manejo, como las podas, afectan la fijación de N₂ por los árboles de sombra leguminosos en plantaciones de café. Estas prácticas afectarán los niveles de fijación de N₂ y la disponibilidad de N en las plantaciones (Nygren y Ramírez

1995). No obstante, Fassbenderm (1987), comparando los balances de nutrientes de asociaciones de café con árboles de sombra leguminosos y no leguminosos estimó que los árboles de *Erythrina poeppigiana* fijaron 60kg N ha⁻¹año⁻¹. Nygren y Ramírez (1995), encontraron que los nódulos de *Erythrina poeppigiana* desaparecieron casi completamente por diez semanas después de la poda, lo que sugiere que pueden haber 20 semanas en el año durante los cuales estos árboles podados (2 veces al año) no fijan N₂ y compiten con el cultivo asociado por el N del suelo.

Arana (2003) encontró que aun cuando se encontraron diferencias en la actividad de fijación de N₂, en el número y peso de los nódulos, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre los sitios (CATIE y Paraíso). También observó una tendencia con nivel superior en CATIE en el número de nódulos activos (19 %), muertos (12 %) y total (18 %) en comparación a Paraíso.

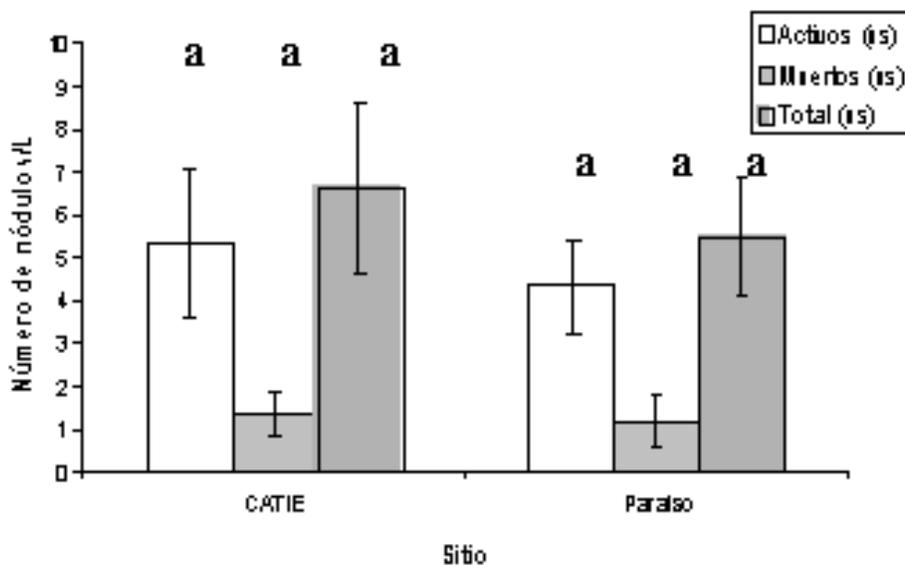


Figura 1. Comparación de nódulos activos, muertos, total de raíces de *Erythrina poeppigiana* en el sistema de manejo orgánico de café en dos sitios contrastantes, Cartago, 2003. Las barras verticales representan el intervalo de confianza al 5 % de probabilidad. Valores seguidos de la misma letra no son significativos a 0.05.

Escalante *et al.* (1984) estimaron que fueron liberados entre 57-66 kg de N ha⁻¹ año⁻¹ a través de la mortalidad y descomposición de nódulos de *Erythrina poeppigiana* no podada, sin diferenciar entre el contenido de N en los nódulos (22-23 kg de N ha⁻¹ año⁻¹) entre parcelas fertilizadas y no fertilizadas. Nygren y Ramírez (1995) encontraron una liberación de 6.8 a 35.4 g N árbol⁻¹ en un ciclo de poda de 23 semanas (9.6 a 50 kg de N ha⁻¹ año⁻¹) a través de la mortalidad y descomposición de nódulos de *Erythrina poeppigiana*. Estos dos estudios sugieren que una proporción significativa de N₂ fijado por los árboles de sombra puede ser transferido dentro del suelo a plantas no fijadoras de N₂.

3.11 Importancia de las interacciones suelo-planta

La agroforestería como sistema de investigación ha hecho incapié en que los estudios de interacción debajo del suelo son fundamentales para entender los procesos de competencia entre cultivos-árboles, ya que estos influyen en las propiedades del suelo y la dinámica.

La distribución de las raíces es generalmente vista como un indicador principal de la competencia entre árboles-cultivos (Schroth 1995), en el supuesto igualdad de recursos disponibles en el suelo, la captación de recursos o nutrientes se relaciona con la longitud de raíz por unidad de volumen en el suelo independientemente de la especie. La competencia por los recursos del suelo puede variar con la distribución espacial y temporal de las raíces, especialmente si los cultivos forestales de base se superponen (cultivos de raíces <5mm); en raíces de escala fina la heterogeneidad de nutrientes podría tener un fuerte efecto en las interacciones subterránea.

3.12 La Raíz

En la mayoría de las plantas la raíz constituye la porción subterránea del esporofito y está especializada para las funciones de sostén, absorción, conducción y, a veces, de almacenamiento. Algunas plantas como la yuca (*Manihot esculenta*) y el chayote (*Sechium edule*), tienen raíces de almacenamiento comestibles. La primera raíz de la planta se

origina en el embrión y se llama raíz primaria. En las gimnospermas y las dicotiledóneas esta raíz penetra directamente en el suelo, dando origen a las raíces secundarias, también llamadas raíces laterales. Alorrizia es la característica mediante la cual una planta desarrolla su raíz embrionaria como raíz principal; de esta se originan las raíces laterales. Las raíces adventicias y sus ramificaciones dan origen a un sistema radical fibroso o fasciculado, en el que ninguna raíz es más prominente que las otras; las raíces típicas suelen penetrar en el suelo a mayor profundidad que las fibrosas. Cuando la planta crece, necesita mantener el balance entre el total de sustancias manufacturadas (fotosintatos) y el total de agua y minerales que se absorben. El balance entre el tallo y la raíz es invariablemente alterado cuando las plantas son transplantadas. La mayoría de las raíces absorbentes finas se pierden al remover la planta del suelo; la poda del vástago ayuda a restablecer el balance entre el tallo y la raíz. (Flores 1994)

Los factores que influyen en la profundidad del suelo son la humedad, temperatura y composición del suelo. La mayor parte de las raíces absorbentes se localizan en el primer metro de profundidad, y la mayoría de las raíces absorbentes de los árboles se encuentran en los 15 centímetros superiores, que es allí donde se encuentra casi siempre la parte más rica en materia orgánica (FAO 2000)

3.12.1 Raíces Finas

Estas son raíces primarias por lo general menores a dos milímetros de diámetro que tienen la función de absorción de agua y nutrientes. Son a menudo muy ramificados y de apoyo a las micorrizas. Estas raíces son de corta duración pero se sustituyen por la planta en un proceso continuo de “volumen de negocios” de la raíz (Doll 2008)

Son más flexibles y frágiles, son utilizadas más para el transporte de los nutrimentos que para su soporte y su tamaño es menor, siendo esta la única diferencia fisiológica y morfológica (Morales 1997)

Los estudios de biomasa de raíces finas en los trópicos son mucho más abundantes que los de raíces gruesas, debido a su importancia en la adquisición de recursos para la vegetación e igualmente como fuente de materia orgánica del suelo (Barreto y León 2005)

La biomasa de raíces, por sí sola, no es un buen indicador de la capacidad de absorción de recursos por las plantas, la densidad de las raíces es un mejor indicador, ya que relaciona la longitud radical por unidad de volumen de suelo. Sin embargo, es claro que las raíces finas son las encargadas de la captura de los recursos en la planta, entre mayor sea su biomasa, mayor será la capacidad adquisitiva. Además, la biomasa de raíces finas está directamente relacionada con condiciones favorables para la fotosíntesis, la estructura y composición florística del bosque, la disponibilidad de nutrientes y su variación con micrositios, con la presencia de oxígeno y con la porosidad y permeabilidad del suelo. Sin embargo, en el estudio de la biomasa de raíces finas muchos autores no han prestado atención a la separación entre vivas y muertas, estimando así la masa de raíces finas, compuesta por la biomasa y la necromasa (Barreto y León 2005)

Las funciones de las raíces están relacionadas con los tejidos que las conforman, el tamaño y características morfológicas de las mismas. El sostén, la conducción de nutrientes y la mayor parte de la fijación de carbono debajo del suelo está a cargo de las raíces que presentan principalmente tejido secundario, mientras que la absorción de nutrientes y del agua están relacionadas con las raíces que presentan tejido primario; estas últimas son comúnmente denominadas raíces finas y se han caracterizado por ser una de las estructuras más dinámicas y activas de la planta (Jiménez *et al.* 2004)

La diferenciación de las raíces “finas” de las “gruesas” es muy difícil y se han propuesto diversas maneras para hacerlo. Uno de los procedimientos más utilizados ha sido la discriminación por medio del diámetro de las raíces usando como parámetros los límites superiores de 2 mm o 5 mm, según sea el objetivo del estudio (Jiménez *et al.* 2004)

IV MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

4.1.1 Ubicación del ensayo

Como parte de un proceso de investigación que durará 20 años, el CATIE estableció en el año 2000, un ensayo de SAF de café en el Sector Bonilla N° 2 de la finca experimental de Turrialba, Costa Rica, ubicado a 9°53'44" latitud Norte; 83°40'7" longitud Oeste, con una elevación de 600 msnm. El fin de este ensayo es estudiar las interacciones que surgen de las diferentes asociaciones, bajo diferentes tipos de manejo, Alto Convencional (AC), Medio Convencional (MC), Medio Orgánico u Orgánico Intensivo (MO) y Bajo Orgánico (BO). El ensayo tiene un área de 9.2 ha, con una densidad de plantación de 5000 cafetos ha⁻¹, con espaciamiento de 2 m entre filas y 1 m entre arbustos. Los árboles para sombra (333 árboles ha⁻¹ los cuales varían según el manejo en los tratamientos), se encuentran plantados dentro de las filas de café, a una distancia de 12 m entre árboles y 7 m entre surcos (árboles con poda drástica) y 12 m x 8 m (árboles con poda regulada). El terreno, con relieve de poco declive, anteriormente estuvo dedicado al cultivo de caña de azúcar (De Melo *et al.* 2002 y Romero 2012)

4.1.2 El suelo

Los suelos se clasifican entre los órdenes Ultisol e Inceptisol. La parte Ultisol (parte baja de los bloques 1 y 3), se caracteriza por la acumulación de arcilla en el horizonte B y baja saturación de bases 1, con texturas entre franco y franco-arcilloso (primeros horizontes), caracterizados por ser químicamente pobres, de color rojizo, ácidos, lixiviados, sin reservas de minerales meteorizables, con saturación de bases menores al 35%, susceptibles a la

compactación, comunes en clima húmedo y sin largas épocas secas. Estos suelos fijan P y complejos de Al y Fe, considerados poco favorables para el desarrollo de los cultivos, ya que son suelos de baja fertilidad (Niuwenhuyse 2005). La parte Inceptisol (parte baja de bloque 2) no presenta acumulación de arcilla. La principal limitante encontrada durante el establecimiento del ensayo fue el mal drenaje, que en capas inferiores (20 a 30 cm) presenta condiciones de redoximorfismo (De Melo *et al.* 2002)

Hasta el 2004 se tenía una precipitación mensual de 224.2 mm y una temperatura promedio de 21.8 °C anual, datos tomados en la estación meteorológica del CATIE (2005). La humedad relativa promedio anual asciende a 88,1%, siendo los meses de enero a abril los que registran las mediciones más bajas, que oscilan entre 85,3 a 87,6%.

4.1.3 Materiales y equipo

Para la ejecución de esta investigación se utilizó: libreta de campo, lápiz grafito, lápiz tinta, marcadores, botas de hule, guantes para jardinería, agua para el lavado de muestras, barreno para la extracción de muestras de raíces y nódulos, navaja para el corte de las raíces una vez extraídas del suelo, refrigeradora para guardar las muestras, tamizador, escáner con caja del luz para la digitalización de raíces, cámara fotográfica, sacos, bolsas plásticas (5 lbs), bolsas de papel (N° 8), machete, carreta, bicicleta, balanzas, cinta diamétrica: DAP, bisturí, el software WinRhizoPro V. 3.9 para analizar los datos obtenidos en el muestreo de raíces, programa de análisis estadístico InfoStat Versión Estudiantil, horno para el secado de los nódulos, biomasa y raíces, computadora y papel aluminio.

4.2 Descripción de los tratamientos, métodos de muestreo y análisis estadístico

4.2.1 Descripción de los tratamientos

En el ensayo de Turrialba, Costa Rica, la parcela principal que utilizó la constituyen dos tipos de sombra, producto del asocio con dos especies arbóreas, una especie de servicio y de uso común en cafetales poró (*Erythrina poeppigiana*) y una especie de uso múltiple en cafetales cashá. Un sistema de sombra se encuentra bajo monosombra (una especie) y el otro en asocio con dos especies arbóreas. La parcela principal está dividida en subparcelas de acuerdo al nivel de manejo (subtratamientos): Alto convencional (AC), medio convencional (MC), medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y bajo orgánico (BO). Los sistemas evaluados están distribuidos en tres bloques (De Melo *et al.* 2002)

Cuadro 1. Resumen de tratamientos del ensayo de SAF de café en Turrialba, Costa Rica

Tipo de Manejo	Niveles de Manejo (Subtratamiento)	Área Efectiva de Medición de Subparcela
Poró	AC, MC, MO, BO	36 m x 10 m
Cashá + Poró	AC, MC, MO, BO	24 m x 18 m

Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

4.2.2 Manejo del experimento

Los arbustos de café son podados selectivamente, al inicio de cada año, posterior a la cosecha de los frutos. Para la regulación de sombra, en poró se realizan dos podas de copa al año (una en enero y otra en junio o julio), en AC la poda es drástica (total); mientras que en MO, MC y BO un árbol se poda drásticamente y otro recibe poda regulada. En los árboles de Cashá y roble coral, las dos especies ya no se podan se hace un raleo (corte del árbol) en las subparcelas que se considere necesario, desde el último estudio realizado en el ensayo de SAF con café en CATIE, Romero (2006)

El control de malezas en AC se realiza cuatro veces al año con la aplicación de herbicidas (random + alay); en los tratamientos con AC el herbicida es asperjado en toda el área de los cafetos. La fertilización se realiza con multiminerales (boro + zinc + cobre) dos veces al año, fertilización al suelo con fórmula compuesta 18-5-15-6-2 (N, P₂O₅, K₂O, MgO y B). 1000 kg ha⁻¹ (100 g cafeto⁻¹), dos aplicaciones por año y 310 kg ha⁻¹ de nitrato de amonio (granulado) una vez al año (62 g cafeto⁻¹)

El control de malezas en MC se realiza dos veces al año aplicando herbicidas (random + alay) en los meses de marzo y agosto, el herbicida es asperjado solamente sobre la fila de café y en la calle se maneja con motoguadaña (aproximadamente 5 cm sobre el suelo) realizándose tres veces al año. La fertilización foliar se realiza con multiminerales (boro + zinc + cobre) dos veces al año. La fertilización al suelo con fórmula compuesta 18-5-15-6-2 (N, P₂O₅, K₂O, MgO y B) 250 kg ha⁻¹ (50 g cafeto⁻¹), dos aplicaciones por año y 160 kg ha⁻¹ de nitrato o amonio (granulado) una vez al año (32 g cafeto⁻¹) para el control de plagas (Broca) se aplica 1 litro de Solver ha⁻¹año⁻¹.

En MO se aplica gallinaza como enmienda orgánica, a razón de 5 t ha⁻¹ (1kg cafeto⁻¹), dos aplicaciones al año, también se le aplica un mineral granulado (Kamac) 100 kg ha⁻¹ (20 g cafeto⁻¹) una aplicación por año. La fertilización foliar se realiza con multimineral (Supermagro) 2 lts x 200 lts de agua, tres aplicaciones por año. La chapia se realiza con motoguadaña (aproximadamente 5 cm sobre el suelo) cinco chapias por año, no se le aplica herbicida para control de malezas, ni plaguicidas para manejo de plagas y enfermedades pero se le aplica el hongo (control biológico) 150 mm ha⁻¹.

Para el BO la fertilización se aplica broza (pulpa de café) como enmienda orgánica, 5 t ha⁻¹ una vez al año. La chapia se realiza con motoguadaña (aproximadamente 5 cm sobre el suelo) cinco chapias por año, dejando buena cobertura en los callejones. No se utiliza herbicidas para el control de malezas, para el control de enfermedades es utilizado un controlador biológico (el hongo) 150 mm ha⁻¹.

4.3 Método de muestreo

4.3.1 Época de muestreo

El presente estudio se inició el 25 de mayo y concluyó el 15 de agosto del 2012.

Para el muestreo se siguió el patrón de manejo de cada uno de los tratamientos del ensayo.

La variable estimación de nódulos de especies arbóreas de sombra se realizó 5 meses después de la primera poda y 25 días antes de se iniciar la segunda (julio inicio de poda) se tomó en cuenta que una vez realizada la poda los nódulos se pudren y pasa un mes para que el árbol vuelva a nodular. Las raíces de las especies arbóreas analizadas fueron extraídas junto con el muestreo de nódulos. El aporte de biomasa en el estrato arbóreo de sombra, fue evaluado de acuerdo al calendario establecido en el ensayo, en el estudio solamente se tomaron datos de la segunda poda (julio) realizada en el año. Es importante mencionar que actualmente solo se poda el poró se encuentre bajo monosombra o en asocio con otra especie.

4.3.2 Estimación de la nodulación y su biomasa

El muestreo de nódulos se realizó 5 meses aproximadamente después de la primera poda en el ensayo de CATIE.

Para esta operación se utilizó un barreno cilíndrico de 10 cm de altura x 5 cm de ancho. Para el muestreo total de nódulos (activos e inactivos) en cada parcela se seleccionaron 2 árboles de poró con poda regulada (PR) y en 2 con poda drástica (PD). En los 4 árboles se tomaran dos submuestras a una distancia del árbol de sombra de 10 cm, luego se unieron las dos submuestras para formar una muestra compuesta. En las combinaciones de dos especies se muestrearon, 4 árboles de poró, ya que es la especie arbórea en estudio.

Las submuestras se tomaron en direcciones diagonal a 45° del árbol de sombra lado norte y lado sur (Figura 2) (adaptada de Arana, 2003). Luego se introdujeron en una bolsa plástica para formar una muestra compuesta, después se lavarón cada una de las muestras, para extraer los nódulos y las raíces y ser llevados al laboratorio.

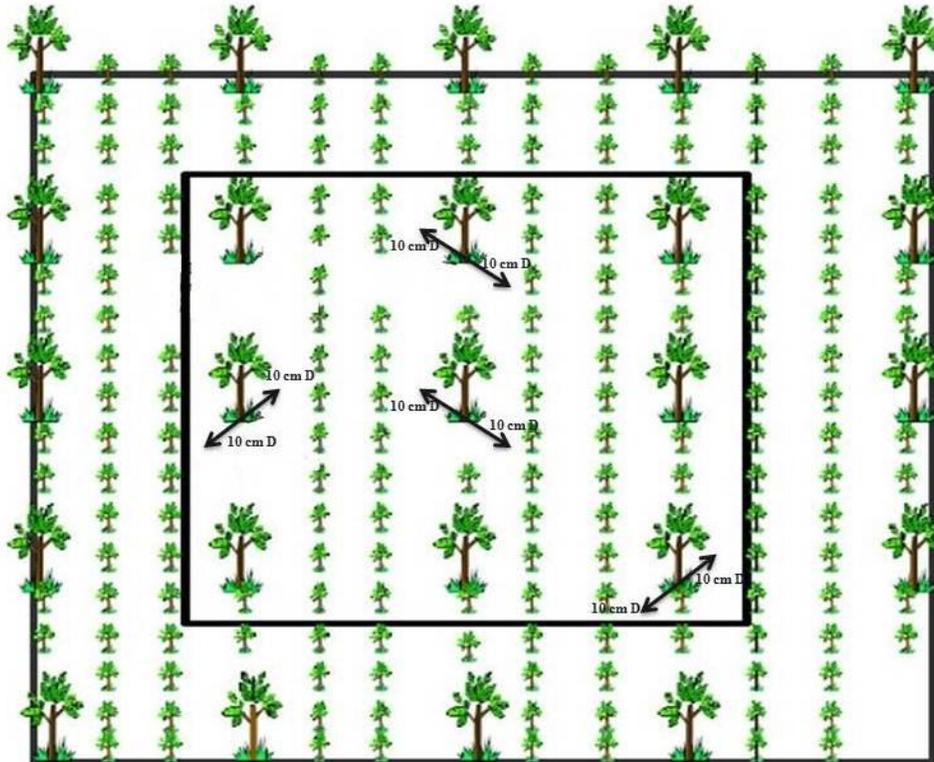


Figura 2. Forma de muestreo en campo de nódulos y raíces en el ensayo de SAF con café CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Cuadro 2. Manejos y muestreo del estrato arbóreo de sombra en el ensayo de SAF con café en CATIE.

Lugar	Manejos	Distancia (cm)	Repeticiones	N° Muestras
CATIE	AC	10 cm	4	24
	MC	10 cm	4	24
	MO	10 cm	4	24
	BO	10 cm	4	24
Total Muestras Poró				96
Lugar	Manejos	Distancia (cm)	Repeticiones	N° Muestras
CATIE	AC	10 cm	4	16
	MC	10 cm	4	16
	MO	10 cm	4	16
	BO	10 cm	4	16
Total Muestras Cashá				48

4.3.3 Cuantificación de la biomasa en residuos de poda del dosel de sombra

Para la medición de biomasa se utilizó las metodologías descritas por Salazar (1989) y Montenegro (2005) adaptadas por Romero, (2006). Para los sistemas en los árboles de sombra, en cada subparcela se seleccionaron al azar un grupo de cuatro árboles (Figura 3)

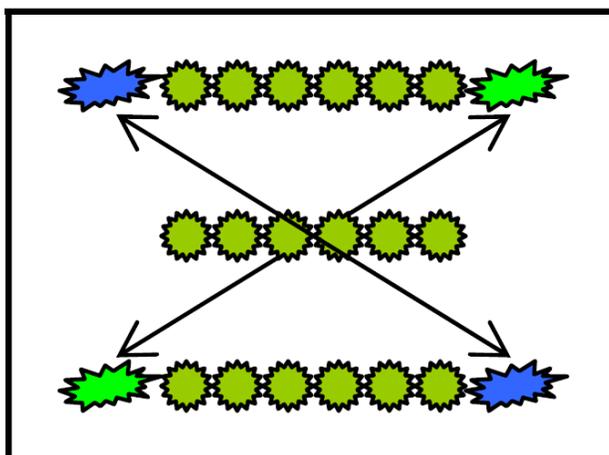


Figura 3. Muestreo en sistemas de la especie arbórea de sombra poró, solo o combinado (adaptado de Romero, 2006)

En los sistemas con arreglo de sombra de poró sólo y combinado, bajo MC, MO y BO, dos de los árboles muestreados fueron con poda regulada y dos con poda drástica, en el manejo AC todos los árboles son podados drásticamente dispuestos de manera diagonal (Figura 3). Cuando se encontró poró en asocio con otras especies, dos árboles de poró serán muestreado con poda regulada (Figura 4a) y dos con poda drástica (Figura 4b), actualmente solo se poda el poró



Figura 4. Muestreo de árboles de sombra con poda drástica (Figura 4a), y con poda regulada (Figura 4b)

Durante la operación de poda, en cada repetición por sistema, el material arrojado de cada árbol, fue clasificado en hojas, peciolo y ramas. Las ramas, a su vez, fueron separadas en ramas delgadas (≤ 2 cm en poró) y ramas gruesas (> 2 cm en poró). Posteriormente, (*in situ*), se pesaron hojas, peciolo y ramas separadamente *in situ*, con el fin de obtener el peso fresco de la biomasa podada, por árbol. Por cada especie y componente arbóreo (hojas, peciolos, ramas delgadas y ramas gruesas), se extrajeron muestras de aproximadamente 250 g, que se colocaron en bolsas plásticas para llevarlas al laboratorio.

En laboratorio, luego de ser pesadas nuevamente las muestras en balanza electrónica, se colocaron en bolsas de papel y llevadas al horno a 60 °C, hasta peso seco constante.

Al retirarlas del horno, las muestras de cada componente se pesaron una vez más, para obtener la relación PS/PV. Luego, con los valores de peso seco y peso fresco de las muestras se obtuvo el porcentaje de materia seca (% MS) para cada una de ellas. Esta proporción de materia seca se multiplicó por el peso fresco de la biomasa cosechada de cada árbol y se obtuvo la materia seca que produjo cada árbol en la operación de poda. Para obtener kg ha^{-1} (regla de tres) MS se promedió la MS de cada árbol, por componente, y luego se multiplicó por su densidad de plantación.

4.3.4 Contenido y aporte de nutriente en la materia seca

Para el análisis del contenido de nutrientes se utilizaron muestras compuestas por cada componente en café, árboles de sombra, vegetación herbácea y hojarasca de todos los muestreos realizados en cada repetición de cada tratamiento. Los análisis químicos de los tejidos fueron realizados en el laboratorio de suelos, tejido vegetal y agua del CATIE. Los elementos analizados en los diferentes componentes vegetales fueron N, P, K, Ca y Mg. El método de análisis fue el de digestión húmeda con mezcla de ácido nítrico-perclórico 5:1. Los elementos Ca, Mg y K fueron determinados por absorción atómica, P por el método colorimétrico del extracto de digestión nítrico-perclórica; y N total por combustión. Fue la metodología utilizada por (Romero 2006), en el estudio realizado se utilizaron los porcentajes de los nutrientes que el encontró en su investigación en 2006, ya que no se contaba con los recursos requeridos para realizar los análisis de los elementos. El aporte de nutrientes se determinó multiplicando la concentración de cada elemento por la biomasa (kg ha^{-1} MS) correspondiente (cuadro 3)

Cuadro 3. Concentración (%) de nutrientes del estrato arbóreo de sombra en SAF café, Turrialba, Costa Rica.

Nutrientes	Poró (<i>Erythrina poeppigiana</i>)		
	% Ho	%RD	% RG
Ca	1.40	0.81	0.25
Mg	0.29	0.20	0.09
K	1.51	1.82	1.04
P	0.32	0.25	0.13
N	5.21	1.63	0.94

4.3.5 Caracterización de raíces

Las muestras utilizadas para la caracterización fueron las mismas que se tomaron para encontrar la estimación de nódulos. Las raíces fueron lavadas en pascón y después llevadas al laboratorio donde se mantuvieron en refrigeradora (para evitar pérdida de peso), después las raíces se escanearon (Figura 5i y 5ii) para ser analizadas con el software WinRhizoPro V. 3.9 para medir la longitud (cm), área proyectada (cm²), diámetro (mm) y volumen de raíz (cm³)



Figura 5. Escáner utilizado para la digitalización de las raíces de las especies arbóreas

4.4 Modelo Estadístico

El diseño experimental utilizado fue un arreglo en parcelas divididas, con tres repeticiones o bloques. A continuación se detalla el modelo estadístico utilizado:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_j + SB_{ij}(\text{Error a}) + M_k + SM_{ik} + Me + \varepsilon_{ijk}$$

- Y_{ijk} = es la variable respuesta
- μ = media general
- S_i = es el efecto del i-ésimo sistema de sombra
- B_j = efecto del j-ésimo bloque
- SB_{ij} = es el término del error "a"
- M_k = es el efecto del k-ésimo manejo
- SM_{ik} = es el efecto de la interacción entre sistema*manejo
- Me = Efecto del muestreo
- ε_{ijk} = es el término del error "b"

4.5. Variables en estudio

Las variables evaluadas fueron: estimación de la nodulación y su biomasa, aporte de biomasa (MS), aporte de nutrientes (Ca, Mg, K, P y N), y caracterización de raíces de árboles de sombra. Los datos correspondientes de cada variable, fueron analizados mediante análisis de varianza (ANAVA) para un diseño con un arreglo en parcelas divididas, con tres repeticiones o bloques. En la variable nódulos los componentes del porcentaje de nódulos activos e inactivos fueron transformados mediante (LOG10) y para biomasa de nódulos activos e inactivos se utilizó (RCUAD). En la variable nutrientes y biomasa se utilizó (LOG10) en todos sus componentes, por último en la variable raíces se utilizó (RCUAD) para los componentes área (cm²), diámetro (mm) y volumen (cm³), con excepción de longitud (cm) donde se utilizó (LOG10) todo esto se realizó ya que su distribución no era normal. Se utilizó el programa de análisis estadístico InfoStat Versión Estudiantil para el análisis.

V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Nodulación

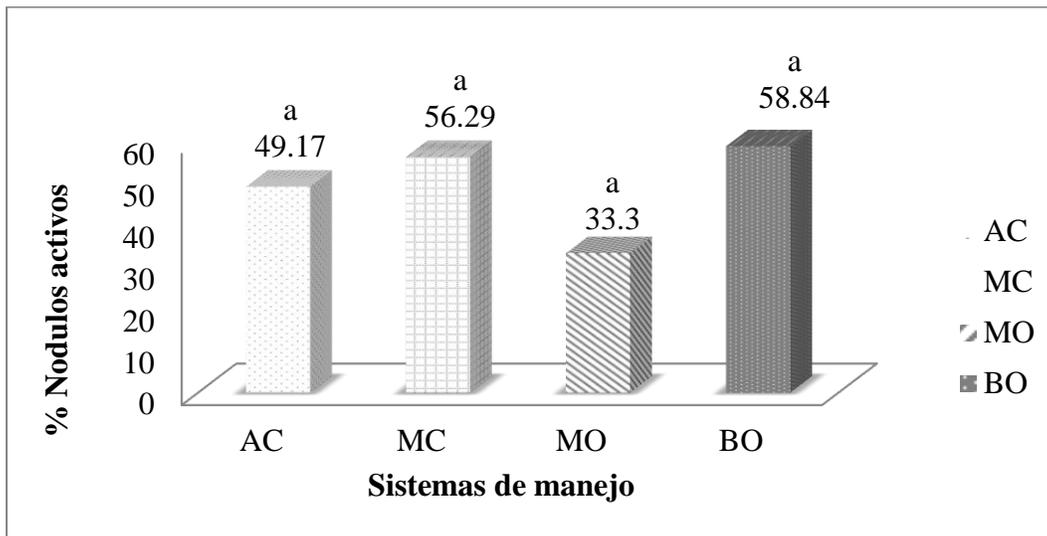


Figura 6. Porcentaje de nódulos activos de *Erythrina poeppigiana* (Poró) en los manejos (AC, MC, MO, BO) bajo los sistemas evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. *Nota:* Manejo: alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

Al comparar el porcentaje de nódulos activos bajo los manejos alto convencional (AC), medio convencional (MC), medio orgánico (MO) y bajo orgánico (BO), no se encontraron diferencias significativas $P= 0.0859$ (Anexo 6)

El manejo donde se presentó la mayor cantidad de nódulos activos 58.84% (Figura 6) manejo bajo orgánico (BO) ya que no hay utilización de fertilizantes químicos, y la enmienda orgánica en combinación con multiminerales hacen posible que los nódulos se desarrollen ya que el nitrógeno aportado de una forma externa es menor, por lo que el árbol se encarga de la fijación. En MC 56.29 % (Figura 6) se necesita buena producción de nódulos en los periodos de poca entrada de fertilizantes ya sean externos (químicos) u

orgánicos. Bajo los manejos anteriores fue donde se encontró nódulos con mayor tamaño y activos, indicando que la planta de poró produce nódulos cuando es verdaderamente importante producirlos.

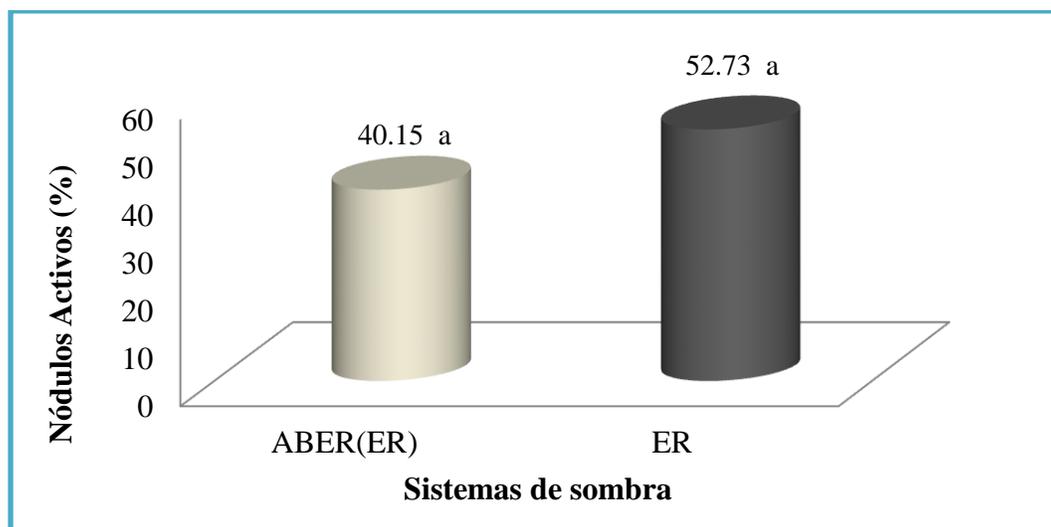


Figura 7. Porcentaje de nódulos activos de *Erythrina poeppigiana* (Poró) en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis de varianza (Anexo 6) no presentó diferencias significativas para los sistemas de sombra evaluados, lo cual pudo deberse a factores relacionados con el tamaño, peso y descomposición de nódulos, sin importar que el poró (ER) se encuentre en asocio con cashá, la producción de nódulos activos presenta la misma variabilidad. El sistema poró (ER) en monosombra presentó 52.73% de nódulos activos (Figura 7), lo cual indica que el mayor rendimiento de nódulos se genera cuando la especie se encuentra sin ningún asocio, por lo tanto los procesos fisiológicos son mejores bajo esta condición

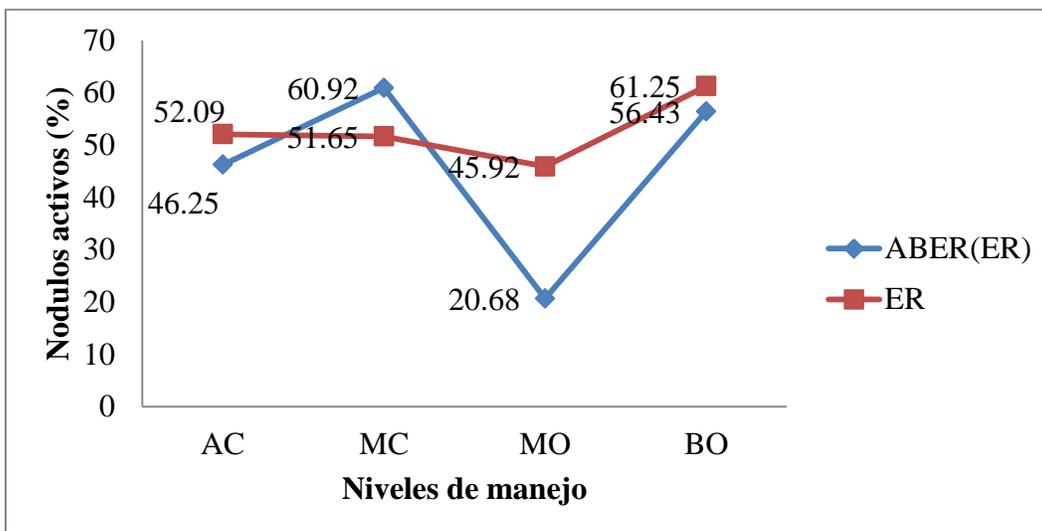


Figura 8. Diámetro de raíces (cm³) del estrato arbóreo de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados para la interacción (sistema * manejo), en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El porcentaje de nódulos activos presenta diferencias significativas para la interacción de sistema * manejo ya que se puede observar que para todos los manejos se presentan promedios diferentes de los demás, donde mejor se da la interacción es bajo los manejos BO y MC para los dos sistemas, es decir que dentro de cada sistemas de sombra influye mucho en el manejo que reciben las subparcelas dentro del ensayo de SAF. El sistema de sombra de poró (solo) releja los muchos atributos que tiene ya que es de mucho provecho en los SAF porque además de fijar N, reciclar nutrientes, producir nódulos, también aporta cobertura vegetal de los residuos de poda realizadas dos veces al año (Figura 8)

El poró presenta gran número de nódulos en sus raicillas y tiene potencial como fijador de N₂ mediante la simbiosis con bacterias del genero *Rhizobium*, que ponen nitrógeno en circulación a disposición de las plantas asociadas (Escalante *et al.* 1984 y Roskoski *et al.* 1982). En un sistema agroforestal con café-poró en Turrialba (61), se encontró una masa de 35 kg Ms de nódulos ha⁻¹, con un contenido de 4.8% N. por otro lado en un sistema agroforestal cacao-poró (Escalante *et al.*, 1984), se determinaron masas de 23 y 24 kg ha⁻¹ de nódulos, en parcelas fertilizadas (45 kg N-P-K ha⁻¹año⁻¹) y no fertilizadas, y se estimó

que a cantidad de nitrógeno en nódulos en descomposición fue de 57 a 66 kg ha⁻¹ en las parcelas no fertilizadas y en las fertilizadas respectivamente.

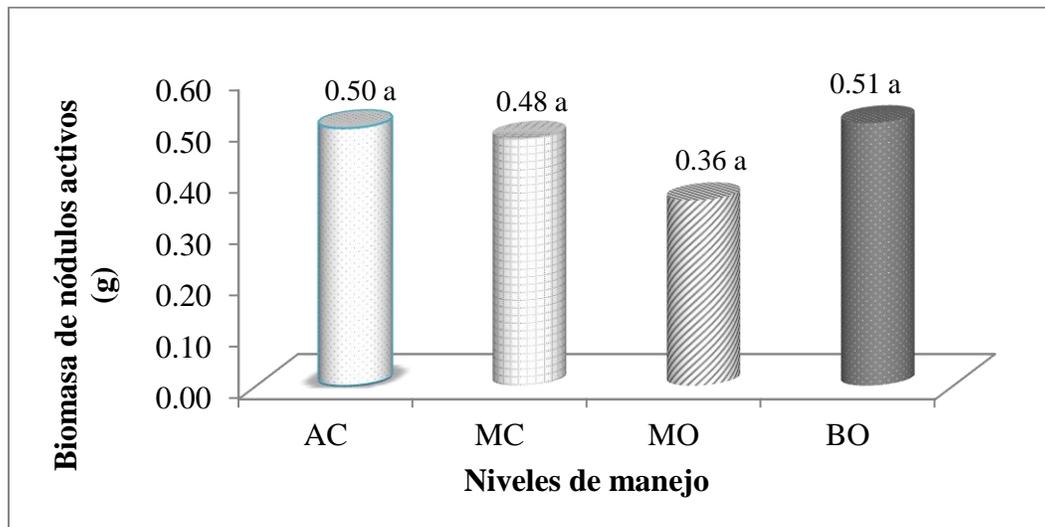


Figura 9. Biomasa de nódulos activos en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en los manejos AC, MC, MO, BO bajo los sistemas evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: manejo: Alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO). BNA (g)= Biomasa de nódulos activos.

Para encontrar la biomasa nodular se dividió el peso seco de nódulos (g) por gramo de raíz producido (peso seco de raíces)

El análisis según el ANAVA (Anexo 9) no reflejó diferencias significativas en los manejos bajo los sistemas evaluados (poró), pero el manejo BO 0.51g (Figura 9), lo que significa que los bajos contenidos de fertilización orgánica no interviene en los procesos de proliferación de nódulos, en BO 0.65g (Figura 9) el manejo con solamente una fertilización de gallinaza al año permite una idónea simbiosis de la planta de poró con el *Rhizobium*. Lo que nos indica que el BO por cada gramo de raíz producida genera muchos nódulos teniendo en cuenta que se forman en las raíces secundarias y terciarias de la planta cerca de la corona o cuello de la raíz principal.

La formación de nódulos en las leguminosas es un proceso muy complejo que no solo se ve influenciado por factores ambientales, sino también por los genéticos propios de ambos

simbiontes. La existencia de nodulación, la abundancia o escasez de nódulos, su tamaño, el tiempo entre la germinación y la aparición de los nódulos visibles son caracteres que dependen de la planta huésped y de la bacteria. Por estas, razones, se debe considerar el realizar varias evaluaciones de nodulación teniendo en cuenta que la amplitud de nodulación es una característica deseable en la especie a recomendar (Illarze, s.f.)

Durlomne *et al.* (2000) en su estudio sobre fijación y ciclaje de N en un sistema silvopastoril con *Gliricidia sepium*, obtuvo un fijación de N atmosférico entre 60-87 %. Pero son similares a los encontrados por Ladha *et al.* (1993) en un cultivo en callejón con *Gliricidia sepium* y maíz en Filipinas, que reportó una fijación de N₂ entre 31-54 %.

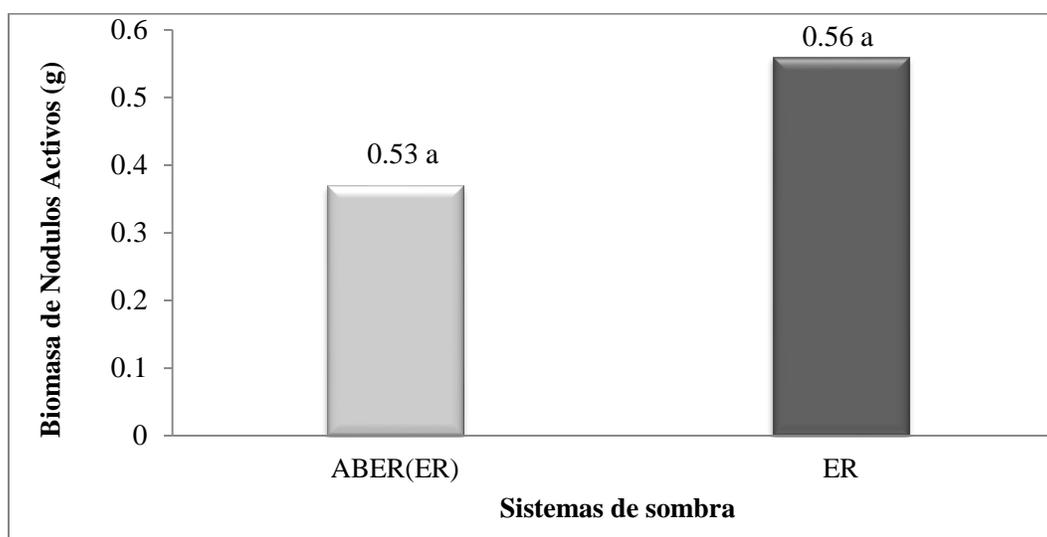


Figura 10. Biomasa de nódulos activos en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en los sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

De acuerdo con el ANAVA (Anexo 8) los análisis, para los sistemas de sombra no reflejan diferencias, indicando así, que la producción de nódulo del poró no se ve afectada independientemente que se encuentra en asocio o bajo monosombra, ER (poró) 0.56g y ABER (poró) 0.53g, (Figura 10) por lo tanto se puede usar cualquiera de los dos sistema para sombra de cafeto en cuanto a nodulación en raíces de poró se refiere, ya que la simbiosis planta-*Rhizobium* es igual o parecida.

5.2 Producción de biomasa en el estrato árboles de sombra

Según el ANAVA (Anexo 9), el análisis para la variable biomasa en árboles de sombra componente hojas (kg ha^{-1}) no refleja diferencias para los manejos en los sistemas de sombra, el mayor aporte de biomasa generado por la poda de copa del poró, lo produce el manejo AC $673.30 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 11), las diferencias entre los demás manejos no varía mucho lo que significa que la biomasa producida bajo los dos sistemas (convencional y orgánico) se encontró en los mismos rangos para todos los manejo. En AC genera mayor residuos de biomasa ya que la poda es totalmente drástica para todos los árboles de poró que se encuentren en el manejo. En el componente hojas, el manejo con mejor rendimiento es AC 26.60%, seguido del MO 25.50%, BO y BC 24.88% y 23.02% respectivamente en los sistemas de sombra (Anexo 1)

De acuerdo con el ANAVA (Anexo 10), el análisis para el componente peciolo no presentó diferencias en los sistemas de sombra, donde se produjo mayor biomasa fue en el manejo MO $210.49 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 11) en relación al resto no fue mucha la diferencia lo cual nos indica que el peciolo se produce (peso y tamaño) en iguales cantidades en todos los manejos. También en los manejos BO $192.89 \text{ kg ha}^{-1}$ y AC $187.87 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 11), los aportes de los árboles de poró no presentan mucha diferencia uno del otro. En las hojas el manejo AC produce gran aporte de hojas y en el componente peciolo el manejo MO aporta muchos peciolos en los residuos de poda, esto se debe a que los peciolos son grandes, miden aproximadamente de 20-25cm. En el componente peciolo proporciona las cantidades más bajas de biomasa siendo MO 27.57% el que más aporte generó, seguido de BO 25.27%, AC 24.61% y MC 22.5% en los sistemas de sombra estudiados (Anexo 1)

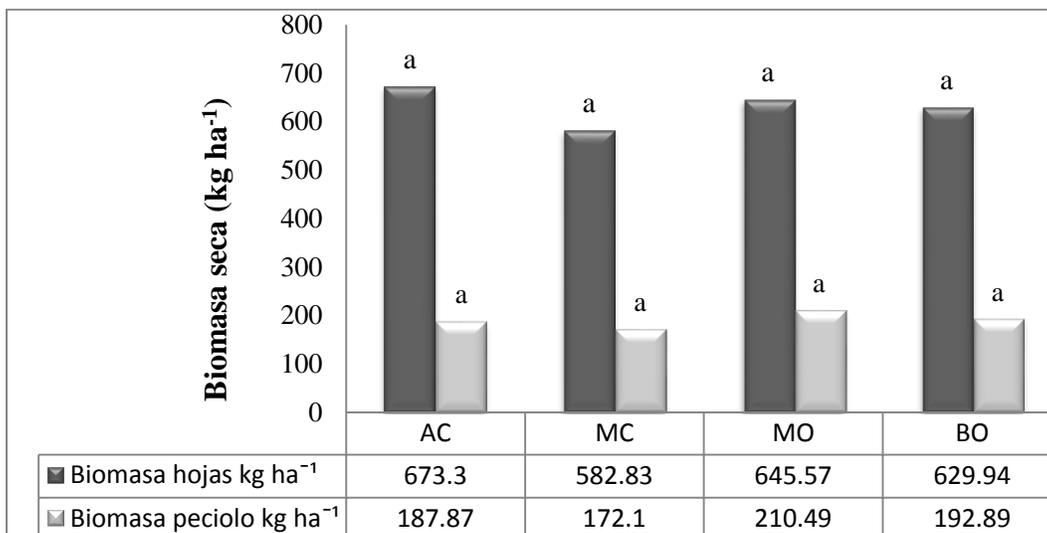


Figura 11. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha⁻¹) de hojas y peciolo en *Erythrina poeppigiana* (Poró) bajo los manejos AC, MC, MO, BO en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo: Alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

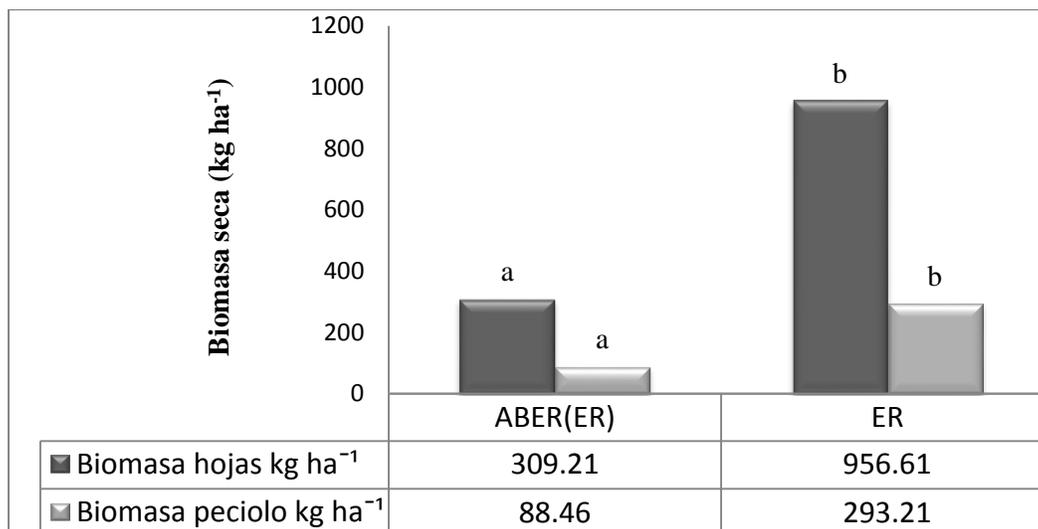


Figura 12. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha⁻¹) de hojas y peciolo en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis reflejó diferencias significativas (Anexo 9) en los sistemas para el componente hojas, siendo el sistema de poró bajo monosombra 956.61 kg ha⁻¹ (Figura 12), los resultados demuestran que el poró aporta mayores cantidades de biomasa en residuos de

poda cuando no compite con otra especie. En el peciolo se observa la misma tendencia (anexo 10) 293.21 kg ha⁻¹ (Figura 12). El poró es un árbol leguminoso que posee la capacidad de recuperar en cuatro meses la biomasa que perdió durante la poda.

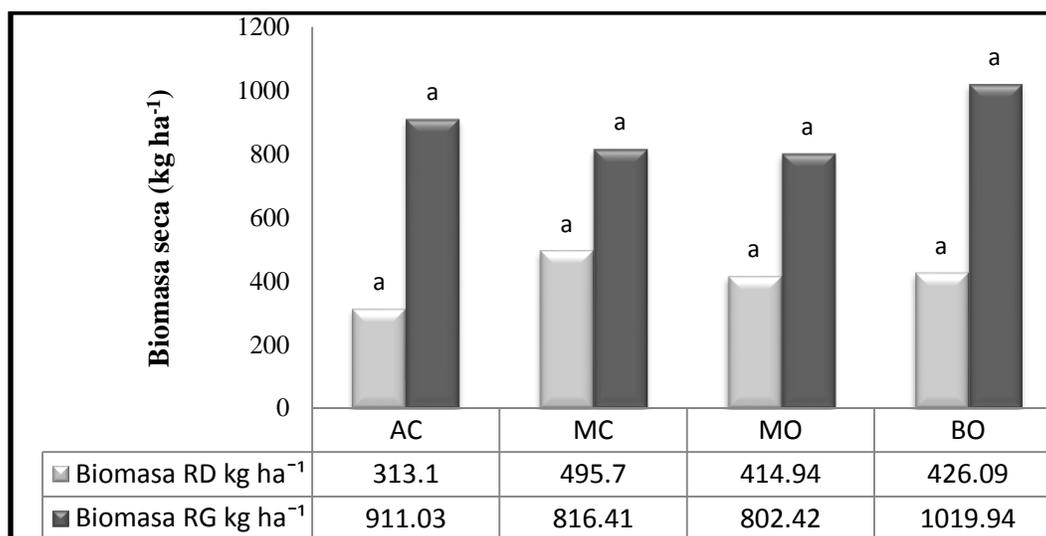


Figura 13. Promedios del aporte biomasa MS (kg ha⁻¹) de rama delgada (RD) y rama gruesa (RG) en *Erythrina poeppigiana* (Poró) bajo los manejos AC, MC, MO, BO en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO), MS=Materia seca, RD= Rama delgada.

El análisis para el componente rama delgada (Anexo 11) no refleja diferencias en los sistemas de sombra, bajo el manejo MC 495.70 kg ha⁻¹ (Figura 13), mitad convencional y orgánico recibe gran aporte de biomasa en el ensayo de SAF con café bajo dos sistemas de sombra, las ramas pequeñas son más frecuentes en el manejo anterior pero no es significativo de los demás ya que todos los promedios se encuentran en los mismos rangos. En el componente rama delgada bajo el manejo MC 30.05%, mayor aporte en residuos de poda, seguido de BO 25.83%, MO 25.15% y AC 18.98% en los sistemas de sombra (Anexo1)

El análisis en el componente rama grande (Anexo 12), para los sistemas de sombra no presenta diferencias significativas en ninguno de los manejos evaluados, se obtuvo el promedio más alto en los manejos BO y AC 1019.94 kg ha⁻¹, 911.03 kg ha⁻¹ (Figura 13)

respectivamente. Bajo estos manejos el aporte de biomasa en residuos de poda es alto ya que los árboles en BO son de copa ancha y en AC la poda es drástica para todos los árboles de poro. El componente rama grande proporciona gran porcentaje de la biomasa seca en residuos de poda, en todos los manejos con relación a los demás componentes (hojas, peciolo y RD), manejo BO 28.73%, aporta en residuos de poda, seguido de AC 25.66%, MC 23.66% y MO 22.60% en los sistemas de sombra evaluados (Anexo 1)

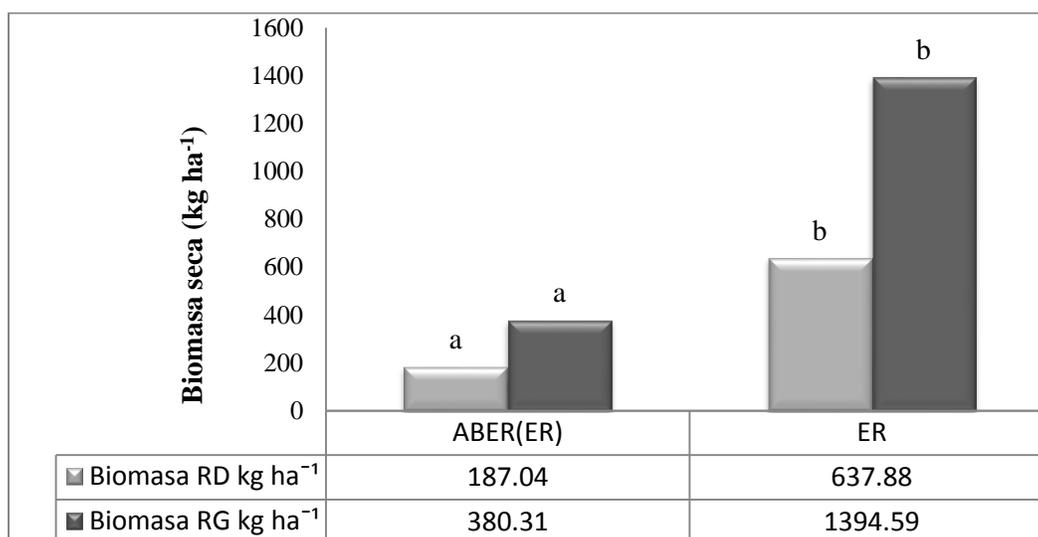


Figura 14. Promedios del aporte biomasa seca MS (kg ha⁻¹) de rama pequeña y rama grande en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis reflejó diferencias altamente significativas (Anexo 11), para los sistemas en el componente rama delgada 637.88 kg ha⁻¹ (Figura 14) bajo el sistema de poró en monosombra (ER) lo que se comprueba nuevamente que la especie arbórea poró se da mejor cuando no está asociada con otra especie, la misma tendencia presentó el componente rama gruesa 1394.59 kg ha⁻¹ (Figura 14) poró solo (ER), indicando que el sistema de poró bajo manejo en monosombra es idóneo para ser utilizado en SAF con café, de acuerdo con el ANAVA (Anexo 12)

5.3 Aporte de nutrientes de la biomasa en residuos de poda del estrato árboles de sombra

a. Aporte de calcio

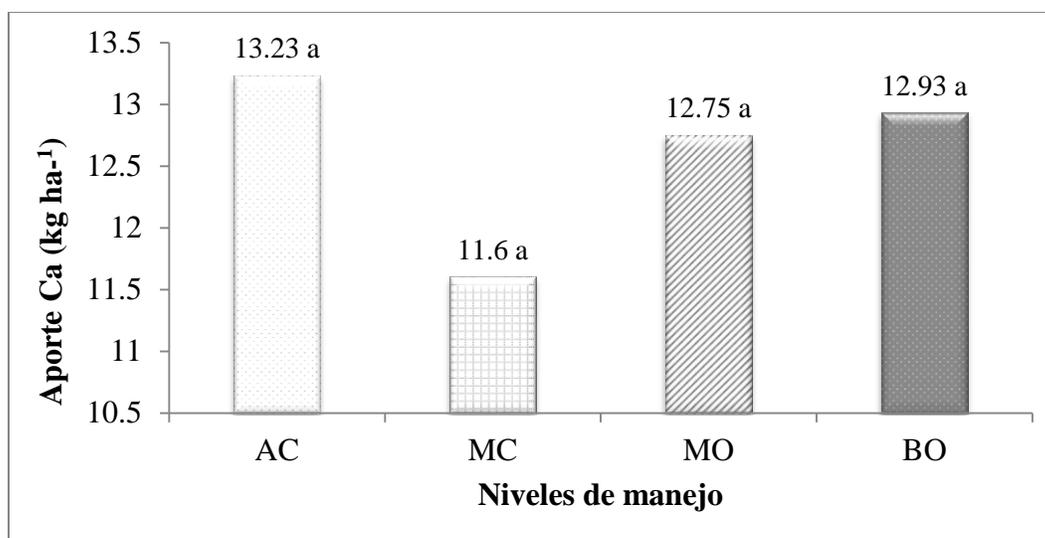


Figura 15. Promedios de aportes totales (kg ha⁻¹) de Ca en el estrato arbóreo de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El análisis (Anexo 13), aporte total de Ca (kg ha⁻¹) no presenta diferencias significativas en ninguno de los manejos bajo los sistemas de sombra evaluados. El manejo que genera mayor aporte es alto convencional (AC) Ca 13.23 kg ha⁻¹ (Figura 15), a pesar de las altas concentraciones de fertilizantes externos aplicados en el manejo, el aporte de Ca en residuos de poda es alto. También en los manejos BO y MO Ca 12.93 kg ha⁻¹ y 12.75 kg ha⁻¹ (Figura 15) son los valores más representativos en los sistemas evaluados.

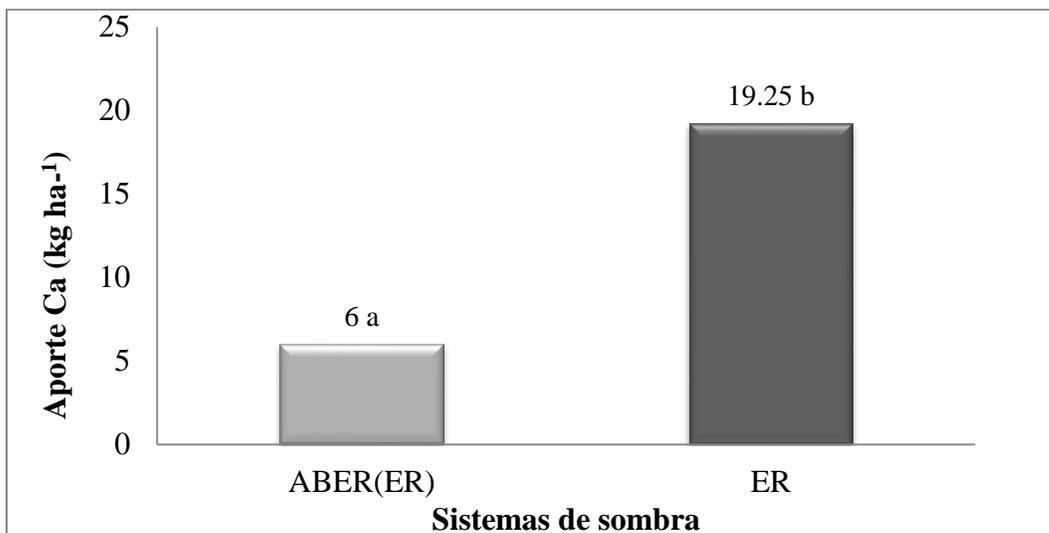


Figura 16. Promedios del aporte de Ca (kg ha⁻¹) en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis según el ANAVA (Anexo 13) presentó diferencias altamente significativas para los sistemas de manejo de sombra ($p = <0.0001$) en la especie arbórea poró bajo el sistema de ER (poró) en monosombra 19.25 kg ha⁻¹ (Figura 16) lo que significa que es mejor utilizar el poró en SAF con café sin la interacción con otra especie arbórea. En cambio cuando se encuentra combinado con cashá su desarrollo es poco, debido a que el cashá es una especie de mayor altura cubriendo los árboles de poró, impidiendo un desarrollo adecuado de los mismos. Los aportes totales de Ca (kg ha⁻¹), sin duda son altamente significativos en el sistema de sombra de poró (solo), para los manejos, a pesar que no se observan diferencias, en los orgánicos podemos encontrar los promedios con menor variabilidad uno del otro.

b. Aporte de magnesio

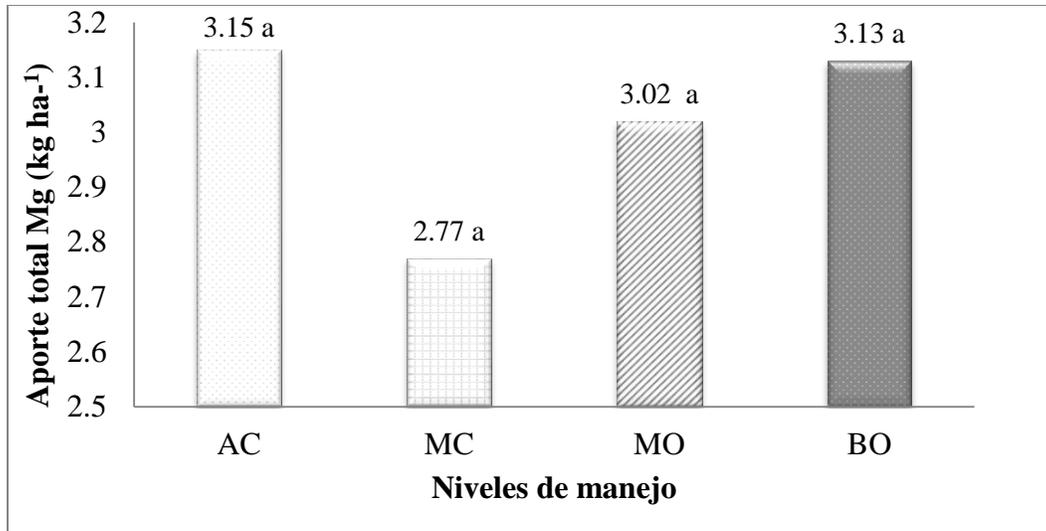


Figura 17. Promedios de aporte total Mg (kg ha⁻¹) en el estrato arbóreo en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El análisis total de Mg (kg ha⁻¹) no reflejó diferencias significativas en los sistemas de sombra (Anexo 14), siendo el manejo AC Mg 3.15 kg ha⁻¹ (Figura 17), donde se observa que la concentración de Mg es mayor, la cual se genera por las altas coberturas de vegetación arbórea que caen al suelo durante las podas que se realizan como parte del manejo, en los dos sistemas de sombra. El Mg es uno de los elementos que se encuentra en menores concentraciones en la biomasa de poda.

El Mg en las plantas, se encuentra en contenidos menores al de Ca (0.15-0.75% de materia seca). Este nutriente forma parte de la molécula de clorofila por lo que se encuentra íntimamente involucrado en la fotosíntesis.

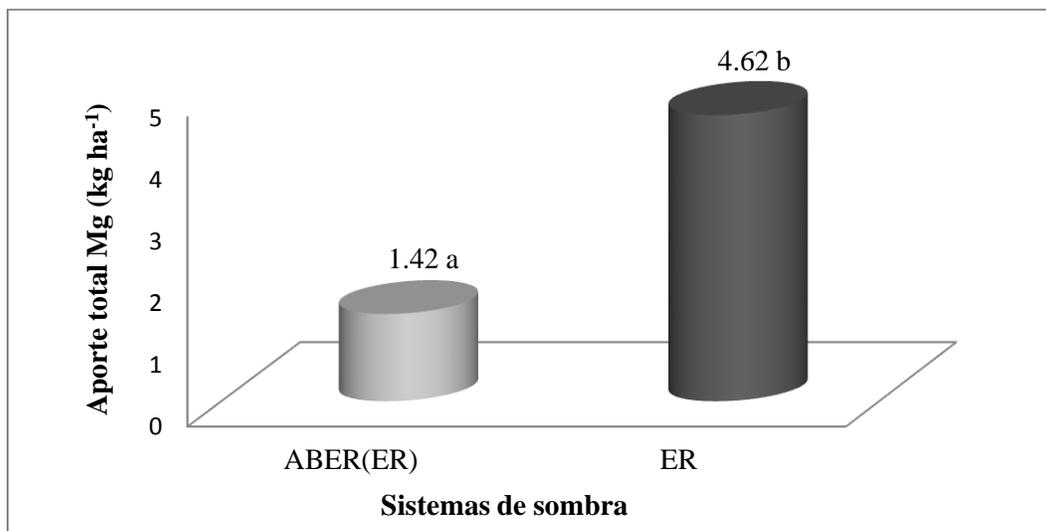


Figura 18. Promedios del aporte de Mg (kg ha⁻¹) en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis presentó diferencias significativas en los sistemas de sombra evaluados (Anexo 14), obteniendo igual que en los resultados anteriores en el sistema de sombra poró ($p < 0.0001$) bajo monosombra 4.62 kg ha⁻¹ (Figura 18), identificando nuevamente que el recicla del nutriente Mg se da mejor en poró sin la incorporación de otra especie ya que las hojas, peciolo rama pequeña y rama grande se desarrollan a plenitud, lo cual permite que las plantas de café bajo estos tipos de sombra, mejoren o mantengan la producción de flores y frutos ideal para, la obtención de buenos rendimientos al momento de la cosecha.

Romero (2006), reportó que al comparar los aportes totales de Mg, tanto a nivel de SAF como dentro del estrato árboles de sombra, las medias de los sistemas de sombra (tratamientos) con poró, superaron significativamente a las medias de los sistemas de sombra (tratamientos) con cashá.

c. Aporte de potasio

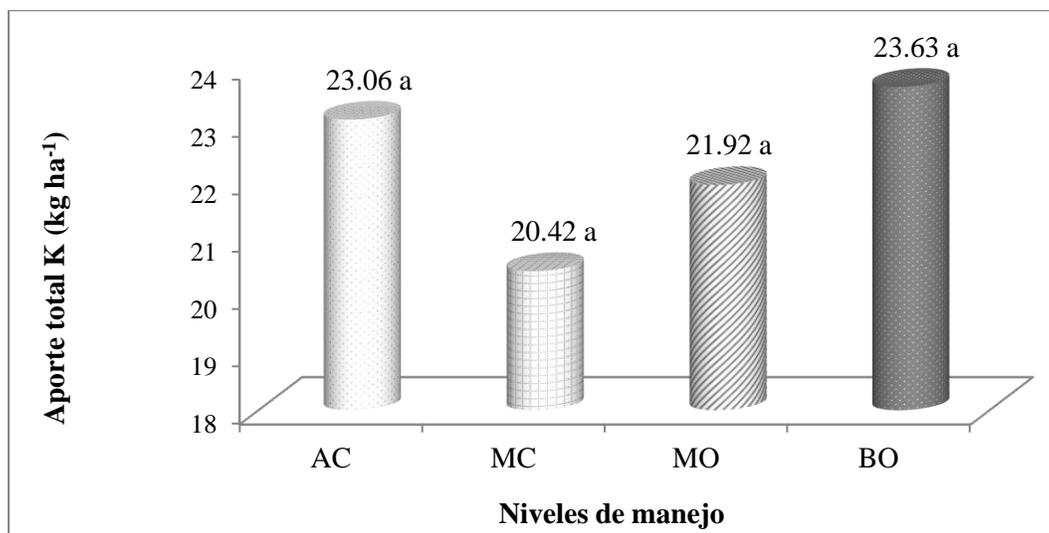


Figura 19. Promedios de aporte total K (kg ha⁻¹) estrato arbóreo en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El K es uno de los elementos que más aporte proporciona el reciclaje de nutrientes a través de la especie leguminosa poró generando cantidades considerables que son útiles para la planta de café y la fertilidad del suelo, valores que coinciden con los reportados por Romero (2006), los cuales siguen tendencias similares a las encontradas bajo el presente estudio, en las concentraciones de nutrientes (N>K>Ca>P>Mg) en el estrato arbóreo.

El análisis global de K (kg ha⁻¹) no refleja diferencias en ninguno de los manejos (Anexo 15), bajo monosombra poró se encuentra la mayor concentración en los manejos BO K 23.63 kg ha⁻¹ y AC K 23.06 kg ha⁻¹ (Figura 19) en el primero es por la cobertura vegetal que se deja cada vez que se poda y no se hace manejos de malezas con herbicidas solamente se realizan 5 chapias periódicas durante el año con motoguadaña, también los árboles de poró son de copa grande y en el segundo es porque la poda es totalmente drástica generando grandes cantidades de biomasa al suelo en las podas realizadas.

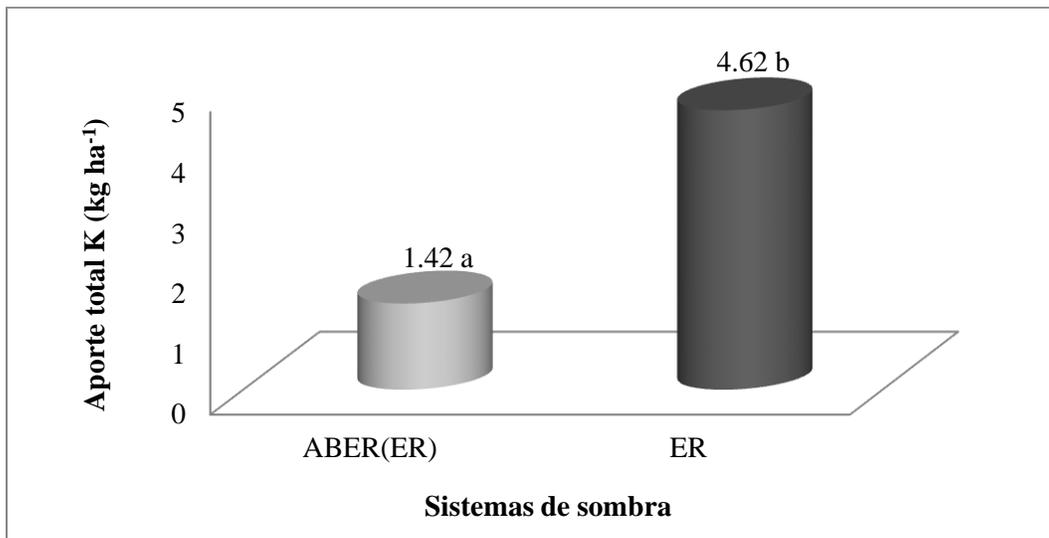


Figura 20. Promedios del aporte total de K (kg ha⁻¹) en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

Según los resultados obtenidos, el análisis de varianza reflejó diferencias significativas (Anexo 15) en los sistemas de sombra evaluados, siendo el sistema de poró (ER) bajo monosombra 4.62 kg ha⁻¹ (Figura 20), ya que el poró posee la capacidad de reciclar los nutrientes a través de sus procesos fisiológicos, haciéndolo a través de los componentes hojas, peciolo, rama gruesa y rama delegada, los cuales presentan concentraciones de K dentro de sus tejidos, ya que se encuentra en concentraciones muy provechosas en la especie arbórea poró.

d. Aporte de fósforo

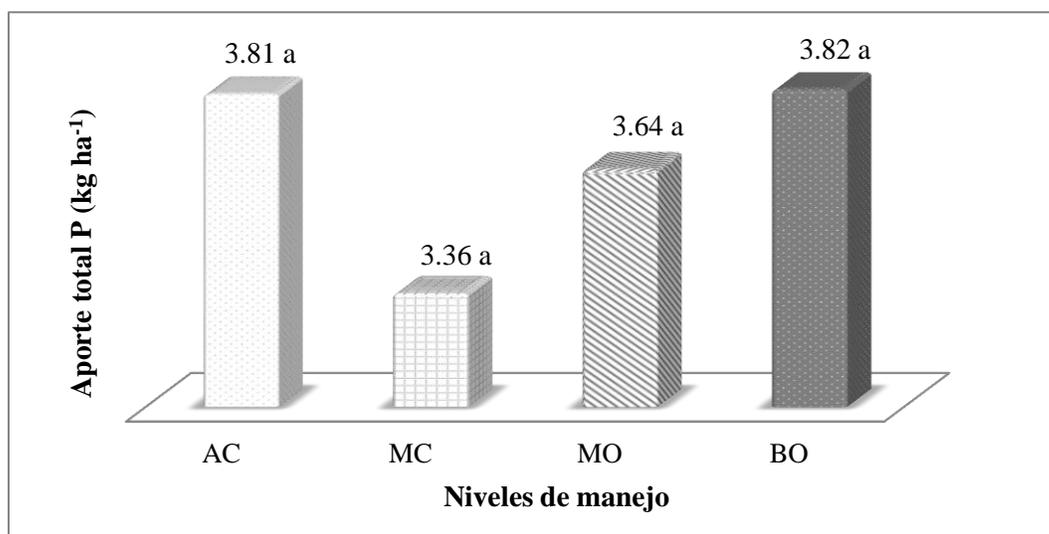


Figura 21. Promedios de aportes totales (kg ha^{-1}) de P en el estrato árboles de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, SAF de café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: Manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El análisis global de P (Kg ha^{-1}) no refleja diferencias significativas (Anexo 16) en los sistemas de sombra evaluados, los manejos con mejor promedio son BO P 3.82 kg ha^{-1} y AC P 3.81 kg ha^{-1} (Figura 21). El P junto a Mg son los elementos que en cantidades inferiores son reciclados por el árbol de poró, es decir los promedios fueron bajos. Estas tendencias se han venido presentado a largo de los promedios en los elementos anteriores, donde los manejos BO y AC son los que mayor relevancia presentan con respecto a los demás manejos.

Los tejidos con concentraciones de N mayores a 20 mg g^{-1} (2%) y mayores a $2,5 \text{ mg g}^{-1}$ (0,25%) de P, son considerados de alta calidad, aunque pueden ser modificados por altos contenidos de lignina y polifenoles (Mofongoya *et al.* 1998)

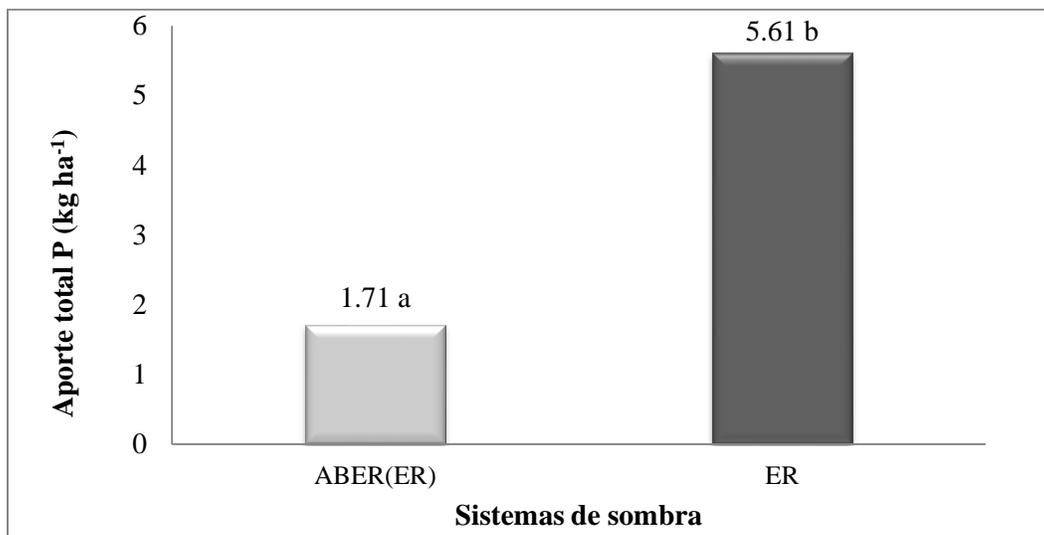


Figura 22. Promedios aporte P (kg ha⁻¹) en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis reflejó diferencias significativas (Anexo 16) en los sistemas de sombra evaluados, en el sistema ER (poró) 5.61 kg ha⁻¹ (Figura 22) ya que los procesos fisiológicos realizados se dan mejor cuando la especie se encuentra sin asociarlo con otra especie. El P es uno de los elementos que más necesita la planta de café, es decir que puede ser un factor limitante debido a la escases de reciclaje y concentración en los tejidos de poró, lo que puede disminuir la producción del café. Las diferencias en los dos sistemas de sombra podrían estar asociadas, es mayor disponibilidad del nutriente en el suelo debido a la incorporación de material orgánico de podas, hojarasca y control del estrato herbáceo, en el sistema de sombra de poró (solo)

Fassbender *et al.* (1985), ellos registraron valores para P 24,2 kg ha⁻¹ en el estrato arbóreo de sombra en SAF de café con poró y café con laurel (en hojarasca más poda), obteniendo valores menores de los reportados en estudios anteriores, lo cual se debe al manejo que se le está dando al estrato de sombra en los últimos años. El P es un nutriente esencia para la planta, es decir que las bajas concentraciones encontradas, pueden limitar la producción del café, indicando que es necesaria la entrada externa (química)

e. Aporte de nitrógeno

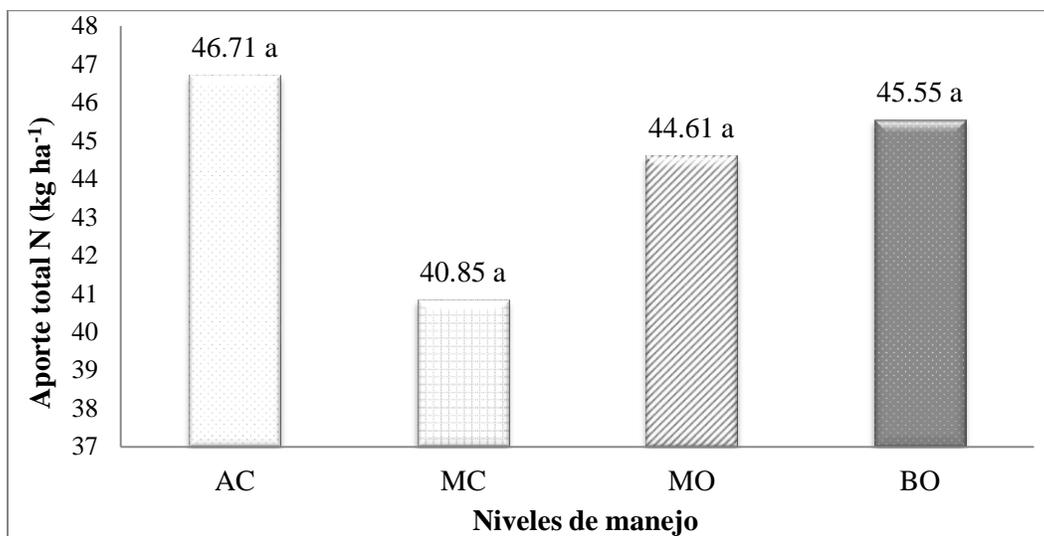


Figura 23. Promedios de aportes totales (kg ha⁻¹) de N en el estrato árboles de sombra en residuos de poda bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados, en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

El análisis global de N (kg ha⁻¹) no refleja diferencias significativas (Anexo 17), para los sistemas de sombra estudiados, en los datos obtenidos el manejo que más proporciona N al suelo es AC N 46.71 kg ha⁻¹ (Figura 23) y BO N 45.55 (Figura 23), como se observa en el resto de los manejos no existen mucha variabilidad entre ellos. Es importante mencionar que el poró tiene la capacidad de aportar grandes cantidades de nitrógeno a través de la vegetación de las podas de copa.

El nitrógeno además de ser reciclado por el poró también es fijado a través de simbiosis con bacterias en el suelo y también por las podas por medio de las hojas y ramas en residuos de poda, es decir que el N₂ es transformado en N de varias formas por las leguminosas.

Para Smaling y Stoorvogel (1990) el 60 % del nitrógeno tomado por las plantas leguminosas podría ser producto de fijación simbiótica, sin embargo este es un rango variable y que podría ir desde 0 -60 %. Durlomne *et al.*, (2000) en un estudio sobre fijación

y ciclaje de N en un sistema silvopastoril con *Gliricidia sepium*, obtuvo un fijación de N₂ entre 60-87%. Bajo esta condición, la contribución de N al suelo por parte del poró, ya sea por fijación biológica, caída de hojarasca y el aporte por las raíces muertas representan factores importantes para el mantenimiento de la fertilidad de los suelos y la sostenibilidad del sistema.

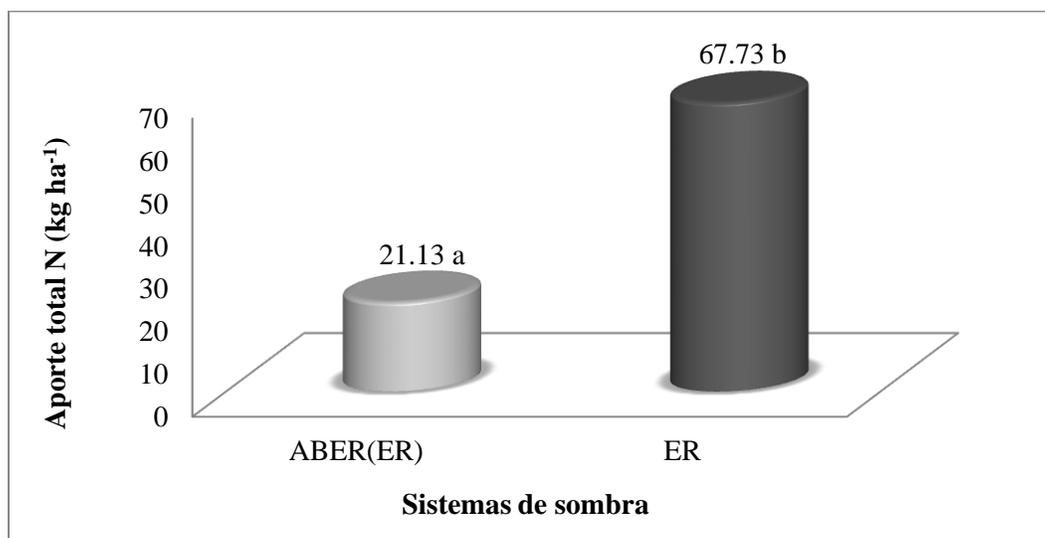


Figura 24. Promedios del aporte MS (kg ha⁻¹) de N en *Erythrina poeppigiana* (Poró) en sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

El análisis reflejó diferencias altamente significativas (Anexo 17) bajo el sistema ER (poró), sin asociarlo con otra especie 67.73 kg ha⁻¹, presentando la misma tendencia en los promedios de los sistemas anteriores, el poró es una especie leguminosa que proporciona grandes cantidades de nitrógeno ya sea fijado biológicamente o a través de las podas que se realizan, ya que las hojas, peciolo, rama delgada y rama grande están conformadas básicamente 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 está influenciada por el tipo de poda y la fertilización (Arana 2003)

Las extracciones de N, P, K, Ca y Mg en las distintas fracciones del poró y en la biomasa cosechada. La hoja es la que extrae la mayor parte de los nutrientes, seguida del tallo leñoso (Rodríguez, 1985)

Cuadro 4. Nutrientes minerales en las fracciones cosechadas del árbol de *Erythrina poeppigiana* (poró)

Tratamientos	NUTRIENTES MINERALES (kg/ha/año)				
	N	P	K	Ca	Mg
Hojas	207	11	55	46	14
Tallo tierno	22	2	16	7	2
Tallo leñoso	40	2	19	9	4

Fuente: Rodríguez, 1985

5.4 Caracterización de raíces

Cuadro 5. Promedio de la distribución espacial de raíces en árboles del estrato arbóreo de sombra, \pm desviación estándar bajo manejos convencionales y orgánicos, en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.

Variables	Sistema		Valor <i>P</i>
	ABER(ER)	ER	
Longitud (cm)	432.64 \pm 37.05 a	411.98 \pm 37.05 a	0.6943ns
Área (cm ²)	32.21 \pm 3.50 a	43.32 \pm 3.50 b	0.0274**
Diámetro (mm)	0.72 \pm 0.01 a	0.81 \pm 0.01 b	<0.0001**
Volumen (cm ³)	1.84 \pm 0.22 a	2.73 \pm 0.22 b	0.0047**

Nota: ER= *Erythrina poeppigiana* (Poró), ABER (ER)= *Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana* (*Erythrina poeppigiana*, Poró).

Longitud (cm) no presentó diferencias significativas (Anexo 18) en ninguno de los sistemas lo que significa que no importa si el poró se encuentre bajo monosombra o en asocio con otra especie las raíces van a adquirir la misma longitud. Área (cm²) presentó diferencias significativas (Anexo 19) en los sistemas de sombra ABER (ER) 32.21 \pm 3.50 y ER 43.32

± 3.50 (Cuadro 4) siendo poró bajo monosombra donde las raíces del poró presentan mejor distribución espacial. En cuanto al diámetro (mm), se observaron diferencias significativas en el sistema (Anexo 20) de poró (ER) bajo monosombra 0.81 ± 0.01 (Cuadro 4), ya que las raíces de poró son más gruesas debido a que no compite por nutrientes con otra especie arbórea de sombra. También el componente volumen (cm^3) presentó diferencias en los sistemas de sombra (Anexo 21), siendo poró (ER) en monosombra 2.73 ± 0.22 . Lo que demuestra que el poró es una especie arbórea de servicio específicamente para ser utilizada en SAF con café.

Cuadro 6. Promedio de la distribución espacial de raíces en árboles del estrato arbóreo de sombra, \pm desviación estándar bajo manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.

Variables	Manejo				Valor <i>P</i>
	AC	MC	MO	BO	
Longitud (cm)	405.64 ± 52.39 a	357.21 ± 52.39 a	433.58 ± 52.39 a	492.8 ± 52.39 a	0.3275ns
Área (cm^2)	31.87 ± 4.95 ab	30.47 ± 4.95 a	43.12 ± 4.95 ab	45.61 ± 4.95 b	0.0712ns
Diámetro (mm)	0.81 ± 0.02 b	0.77 ± 0.02 ab	0.71 ± 0.02 a	0.79 ± 0.02 b	0.0043**
Volumen (cm^3)	2.04 ± 0.31 ab	1.87 ± 0.31 a	2.46 ± 0.31 ab	2.79 ± 0.31 b	0.1448ns

Nota: manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

En longitud (cm) no se encontraron diferencias significativas (anexo 18) en los manejos, los cuales fueron evaluados bajo dos sistemas de sombra. En el componente área (cm^2) existen diferencias en los manejos evaluados (anexo 19), específicamente en los orgánicos (BO) 45.61 ± 4.95 y MO 43.12 ± 4.95 (cuadro 5) bajo estos manejos no se utilizan fertilizantes químicos solamente orgánicos lo que permite una distribución especial adecuada por las altas concentraciones de nutrientes generados por las enmiendas orgánicas. El diámetro (mm) se obtuvieron diferencias (anexo 20) en el manejo convencional (AC) 0.81 ± 0.02 , ya que los árboles son podados totalmente generando buena cobertura vegetal al suelo y mayor acumulación de nutrientes en las raíces de poró. También el volumen (cm^3) presentó diferencias significativas (anexo 21), para todos los manejos pero el de mayor relevancia es BO 2.79 ± 0.3 , donde se presenta mayor diversidad de raíces de poró.

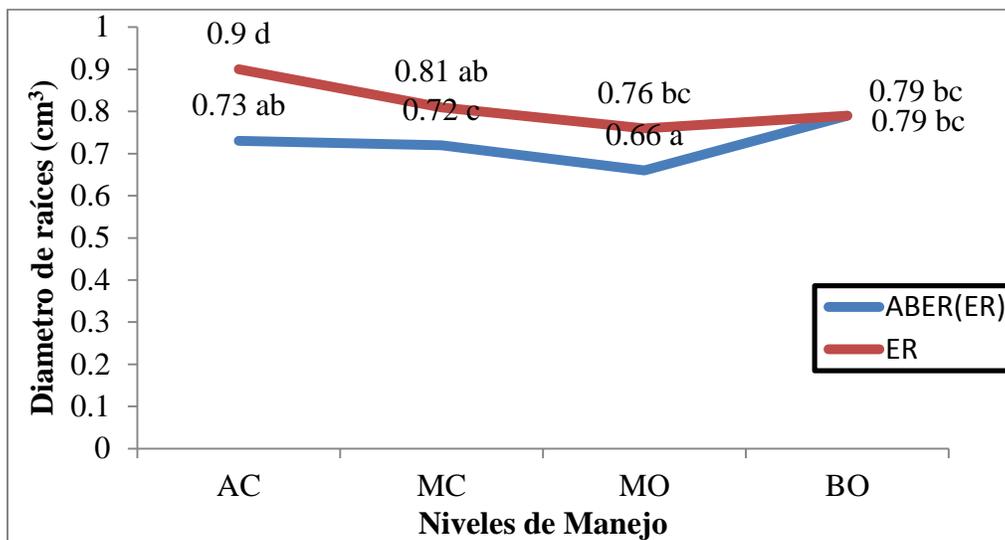


Figura 25. Diámetro de raíces (cm³) del estrato arbóreo de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en dos sistemas de sombra evaluados para la interacción (sistema * manejo), en el ensayo de SAF con café, en Turrialba, Costa Rica. Nota: manejo alto convencional (AC), manejo medio convencional (MC), manejo medio orgánico u orgánico intensivo (MO) y manejo bajo orgánico (BO).

Las interacciones altamente significativas para los manejos con respecto a los sistemas de sombra, es decir a mayor diámetro de raíces los sistemas de sombra más se acercan al manejo BO, observando que para cada sistema el diámetro es de 0.79, indicando que bajo este manejo, las raíces son de mayor espesor o diámetro. También la interacción nos indica que el sistema de sombra de poró (solo) posee mejores promedios de diámetro para los manejos MC 0.81 y MO 0.76, superando al sistema de sombra en asocio (Figura 23)

VI CONCLUSIONES

En la nodulación para los dos sistemas de sombra evaluados, bajo el manejo BO se produjeron más nódulos activos. Donde se observó mayor cantidad de nódulos es en el sistema de sombra poró (solo), ya que no tiene la competencia del cashá, el cual es una especie arbórea de dosel, por los manejos anuales de poda que se le aplican al poró.

Para la variable biomasa en residuos de poda en los manejos BO y AC presentaron mayor contenidos de biomasa podada, ya que en el manejo bajo orgánico (BO), los árboles de poda regulada producen cantidades considerables de biomasa y en AC los árboles son de poda drástica por lo que su aporte se refleja en los resultados, es importante mencionar que en los análisis no se encontraron diferencias en los manejos. El componente que produjo más biomasa fue rama grande en los sistemas de manejo evaluados.

En el aporte de nutrientes del poró es mejor cuando este se encuentra bajo monosombra para los dos sistemas de sombra (tratamientos)

El P es uno de los factores limitantes que puede aumentar o disminuir la producción de un cultivo, y en los manejos evaluados en el ensayo se encontró en cantidades mínimas, lo que significa que al disminuir su aplicación, la producción podría disminuir.

En los manejos bajo los dos sistemas de sombra evaluados el aporte de nutrientes en mayor cantidad se presentó en nitrógeno, luego en potasio y en menores cantidades fue en calcio, fósforo y magnesio. En los residuos de poda de poró bajo los manejos BO y AC el aporte de N fue alto en comparación a los demás, lo que indica que en BO las enmiendas orgánicas más la poda hacen posible estos aportes y en AC las entradas externas

(fertilizantes químicos) y los residuos de poda se combinan para aumentar la producción de Nitrógeno.

Las raíces de mayor diámetro se encuentra en el manejo BO bajo el sistema de sombra poró (solo), indica que las raíces del poró se adaptan de forma eficiente e idónea en los SAF con café.

Los sistemas de sombra presentan diferencias significativas para cada una de las variables estudiadas, siendo el poró (solo) que se encuentra muy por encima del sistema asociado con cashá.

VII RECOMENDACIONES

Se deben continuar los estudios sobre nodulación para identificar la importancia que representan en los SAF, para encontrar una forma más exacta de calcular la cantidad de N que es fijado a través de ellos por el árbol de *Erythrina poeppigiana* (poró)

Para lograr la sostenibilidad que actualmente se busca por medio de los SAF con café y disminuir los costos de producción que son factor de importancia para los pequeños productores se recomienda utilizar el manejo BO.

Es importante seguir haciendo estudios en las raíces de los árboles de sombra utilizados en SAF ya sea con café o no, ya que los estudios realizados son escasos.

VIII BIBLIOGRAFÍA

Arana Meza, VH. 2003. Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*coffea arabica*) asociado con poró (*erythrina poeppigiana*). Tesis. *Magister Scientiae* agroforestería tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 118 pp

Baca, BE. Soto, L; Pardo, ME. 2000. Fijación biológica de nitrógeno. Elementos (revista trimestral). Elementos 38(7) pp

Barreto, LH. León, JD. 2005. Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de ecosistemas forestales (*Pinus patula Schltldl* y *Cham Cupressus lusitanica Mill* y *Quercus humboldtii Bonpl*) de Piedras Blancas, Antioquia-Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. Medellin, 58: (15). 45-60 pp

Beer J. Harvey, C. Ibrahim, I. Harmand, MJ, Somarriba, E, Jimenez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Agroforestería en las Américas 28: (10). 37–38pp

Beer, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (*Coffea arabica*) or cacao (*Theobroma cacao*) plantations whit shade trees. Agroforestry Systems 38:(1). 139–164pp.

Beer, J. Muschler, R. Kass, D. Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. Agroforestry systems. 38:(1). 139–164 pp.

Berninger, F. Salas, E. 2003. Biomass dynamics of *Erythrina lanceolata* as influenced by shoot- pruning intensity in Costa Rica. Agroforestry Systems 7:(57) 19–28 pp.

Bertsch, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José. 157 p.

Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 174 p.

Borin, PO. Pimental, DC. 2003. Discussing ecological, economic and social sustainable of the Brazilian organic coffee growers. Tesis. *Magister Scientiae* University and Research Centre, Wageningen, the Netherlands. 125p.

Bornemisza, E. 1982. Nitrogen cycling in coffee plantations. *Plant and Soil* 28:(67) 241–246 pp.

Boyce, J. Fernández, A. Furst, E, Segura, O. 1993. Crisis e innovación cafetalera en Costa Rica: el café orgánico como opción de desarrollo sostenible. Simposio Internacional Modernización Tecnología. cambio social y crisis cafetalera Universidad Nacional, ICAFE. 20 p.

Cardona, CDA Sadeghian, KHS (2005) Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrío de *Inga* spp. 56(2) 127–141 pp.

Cardoso, IM. Boddington, C. Janssen, BH, Oenema, O, Kuyper, TW. 2003. Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agroforestry Systems* 58:33-43 pp.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Ensayo Comparativo de Sistemas de producción de café orgánico y convencional. Turrialba, Costa Rica. /Proporcionado Por M. Sc. Gabriela Soto, Vía Correo. Coordinadora del Depto. Agroecología CATIE. 19-04-2012 pp.

CATIE. (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) 2001. Sostenibilidad y sinergismo en sistemas agroforestales con café: estudio de interacciones entre plagas, fertilidad del suelo y árboles de sombra. *Agroforestería en las Américas*. 29:(8). 49-51 pp.

Cordero, J. Barrance, A. Beer, J. Boshier, DH Chamberllain, J. Detlefsen, G. Finegan, B. Galloway, G. Gómez, M. Gordon, J. Hands, M. Hellin, J. Hughes, C. Ibrahim, M. Kass, D. Leakey, R. Mesén, F. Montero, M. Rivas, C. Somarriba, E. Stewart, J. Pennington, T. 2003. Descripciones de especies de árboles nativos de América Central. en *Árboles de Centroamérica*: 311-958pp

De Melo, E. Hagggar, JP. Staver, CP. 2002. Sostenibilidad y sinergismo en sistemas agroforestales con café: estudio a largo plazo de interacciones agroecológicas. *Café-cacao* 3:(1) 31–35 pp.

Doll, U. Vallejos, O. Bilbao, N. Jara, C. 2008. Estimación preliminar de la retención de carbono en raíces finas y mantillo de un renoval de *Nothofagus glauca* de la percordillera andina de la región del Maule, Universidad de Talca, Talca, Chile. 96 pp.

Durlome, M. Sierra, J. Nygren, P. Cruz, P. 2000. Nitrogen fixation and recycling of the fixed nitrogen in a cut-and-carry silvopastoral system under subhumid tropical conditions (Guadeloupe, French Antilles). *International Symposium o Silvopastoral Systems. Second Congress on Agroforestry and Livestock Production in Latin America*. San José, Costa Rica.

Escalante, G. Herrera, R. y Aranguren, J. 1984. Nitrate fixation in shade trees (*Erythrina poeppigiana*) in cacao plantations in North Venezuela. 19 (s/n). 223-230pp.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación,). 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. (En línea). Consultado el 23 abril 2012. Disponible en <http://www.fao.org>

Fassbender, HW. 1992. Modelos edafológicos de los sistemas de producción agroforestal. Turrialba, CR. Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 185–470 pp.

Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de Sistemas Agroforestales. Turrialba, Costa Rica. 231 262 pp.

FUNDESYRAM (Fundación para el Desarrollo Socio Económico y Restauración Ambiental). 2010. Guía para la innovación de la caficultura. FUNDESYRAM. San Salvador, El Salvador. 73pp. Disponible en: http://www.fundesyram.info/document/pdfpub/guia_cafe_ok.pdf 18-04-2012.

Gliessman, SR. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en la agricultura sostenible. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 359 pp.

Glover, N. Beer, J. 1986. Nutrient cycling in two traditional Central American agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 4:(s/n). 77–87pp.

Gómez Aristizábal, A. 1992. El sombrío en los cafetales conserva la capacidad de producción de los suelos. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Departamento de Recursos Naturales. Informe. Santafé de Bogotá. 6 pp.

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(8) 22-29 pp.

Herrera, R. Aranguren, J. Escalante, Cuenca, G. Accardi, A. Navidad, E y Toro, M. 1987. Plantaciones de cacao y café bajo árboles de sombra en Venezuela. Avances en la Investigación agroforestal: Memoria del seminario. Turrialba, Costa Rica, CATIE-GTZ. 196-205 pp.

Heuveldop, J. Alpizar, L. Fassbender, HW. Enríquez, G. Folster, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba 5:(4) 347–355 pp.

Illarze Dive, G. Eficiencia simbiótica entre *Desmanthus spp.* y rizobios nativos del Uruguay. Tesis. Licenciatura en ciencias biológicas. Universidad de la República de Uruguay. 53 pp.

Jiménez, E. Martínez, P. 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero: II producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. BIOTICA 4:(3) 109–126 pp.

Jimenez, F. Muschler, R. Kopsell, E. 2001. Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica. 187 pp.

Jiménez, RC. Arias A. D. 2004. Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en una gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica.

Julca-Otiniano, A. Carhuallanqui-Pérez, R. Crespo-Costa, R. 2002. Efecto de la sombra y la fertilización sobre la población de hongos y bacterias del suelo en café var. "Catimor" en Villa Rica, Selva Central de Perú. Café Cacao 3:(2)74-77 pp.

Ladha, JK. Peoples, MB. Garrity, DP. Capuno, VT. and Dart, PJ. 1993. Estimating dinitrogen fixation of hedgerow vegetation using the nitrogen 15 natural abundance method. *J.57:(s/n) 732-737 pp.*

Lampkin, N. 2001. 1999. Productividad, mano de obra y costos variables en fincas cafetaleras orgánicas y convencionales de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas. 6(23): 24-26 pp.*

Lavelle, P. Senapati, B. Barros, E. 2003. Soil macrofauna. *In Trees, Crops and Soil Fertility*. Eds. G. Schroth y F.L. Sinclair. CAB Internacional. 303-323pp.

Mofongoya, PL. Giller, KE. and Palm, CA. 1998. Descompositon and nitrogen reléase patterns of tree pruning and litter. *Agroforestry systems 38:(S/n). 77-97pp.*

Monge, L. 1999. Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo del café orgánico en Costa Rica. *In XI Congreso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos (1999, San José, CR). Memoria. San José, Costa Rica. 17pp.*

Monge, LF. 1999. Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo del café orgánico en Costa Rica. *XI Congreso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos (Brasil 1999). Conferencia 77. 175-191 pp.*

Montagnini, F. 1992. *Sistemas agroforestales: Principios y aplicaciones en los trópicos. 2 ed. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica. 622p.*

Montagnini, F. Jordán, CF. Matta, R.M. 1999. Reciclaje y eficiencia de nutrientes en sistemas agroforestales. *Yvyrareta 9:(s/n). 21-40pp.*

Montenegro, GEJ. 2005. Efecto de la dinámica de la materia de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional. Tesis M.Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 67pp.

Montenegro, H. Malagón, D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. Subdirección agrícola. 813pp.

Morales, RE. 1997. Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales en simposio internacional “posibilidad de manejo forestal sostenible en América. tropical”. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

Muschler, R. 2000. Árboles en cafetales. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica. 139pp.

Nygren, P. 1995. Carbon and nitrogen dynamics in *Erythrina poeppigiana* (leguminosae: phaseoleae) trees managed by periodic prunings. Doctoral thesis in Agricultural and Forestry, University of Helsinki, Department of Forest Ecology. 51 pp.

Nygren, P. y Ramírez, C. 1995. Production and turnover of N₂ fixing nodules in relation to foliage development in periodically pruned *Erythrina poeppigiana* (Leguminosae) trees. For Ecol Man 73:(s/n) 59-73 pp.

Palm, CA. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. Agroforestry Systems 30:(s/n). 105–124pp.

Rao, M.R. Nair, PK. Ong. C.K. 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. Agroforestry Systems 38:(s/n) 5–50pp.

Rodríguez Fúnez, RA. 1985. Producción de biomasa de poró gigante (*Erythrina poeppigiana*) y King grass (*pennisetum purpureum*) intercalados, en función de la densidad de siembra y la frecuencia de poda del poró. Tesis. *Magister Scientiae*. Turrialba, Costa Rica. 117pp.

Romero López, SA. 2006. Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. Caturra), con tres niveles de manejo. Tesis. *Magister Scientiae* en Agroforestería Tropical. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 128 pp

Romero, L. 2012. Entrevista personal con el encargado de campo del ensayo de SAF con café. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

Russo, RO. 1983. Efecto de la poda de *Erythrina poeppigiana* (poró), sobre la nodulación, producción de biomasa y contenido de N en el suelo en un sistema agroforestal Café-Poró. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. 108 pp.

Russo, RO. Budowsky, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomasa of *Erythrina poeppigiana* as a coffee shade tree. *Agroforestry Systems*. 4:(s/n). 145–162pp.

Sadeghian, S. Rivera, JM. Gómez, ME. 1997. Impacto de la ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. Memorias de una conferencia electrónica realizada de abril a septiembre 1998. 123-142pp.

Salazar, R. 1989. Guía para la investigación silvicultural de especies de uso múltiple. Turrialba, CR. Proyecto Cultivo de Árboles de uso Múltiple (MADELEÑA/CATIE). 43–51 pp. (Serie técnica – boletín técnico N° 29).

Samayoa, JO. 1999. Desarrollo de enfermedades en café bajo manejo orgánico y convencional en Paraíso, Costa Rica. Tesis M.Sc. Cartago, Costa Rica, CATIE. 65 pp.

Schroth G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30:(s/n). 125-143pp.

Schroth, G. Lehmann, J. Rodríguez, MR. Barros, E. Macêdo, J.L.V. 2001. Plant and soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems* 53:(s/n). 85-102pp.

Smaling EMA. Stoorvogel, J.J. 1998. Research on soil fertility decline in tropical environments: integration of spatial scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50:(s/n) 151-158pp.

Sosa, LM. Escamilla, E.P. Díaz, S.C. 2004. Organic coffee. In Wintgens J.N. growing, processing, sustainable. Wiley-UCH, Weinheim 339-354pp.

Steppler, HA Nair, P.K.R. (eds). 1987. *Agroforestry: a decade of development*. ICRAF, Nairobi, Kenya. 335pp.

Szott, LT. Palm, C.A. 1996. Nutrient stocks in managed and natural humid tropical fallows. *Plant and Soil*. 186:(s/n). 293-309pp.

Uribe H.A. 1971. Erosión y conservación de suelos en café y otros cultivos. *Cenicafé* 22(1):1-17. USDA (United States Department of Agriculture) 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 82 pp.

|

ANEXOS

Anexo 1. Promedios de biomasa (MS) del estrato árboles de sombra en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

Variables	Manejo								Total	%
	AC	%	MC	%	MO	%	BO	%		
Biomasa hojas kg ha ⁻¹	673.30	26.60	582.83	23.02	645.57	25.50	629.94	24.88	2531.64	100
Biomasa peciolo kg ha ⁻¹	187.87	24.61	172.10	22.55	210.49	27.57	192.89	25.27	763.35	100
Biomasa RD kg ha ⁻¹	313.10	18.98	495.70	30.05	414.94	25.15	426.09	25.83	1649.83	100
Biomasa RG kg ha ⁻¹	911.03	25.66	816.41	23.00	802.42	22.60	1019.94	28.73	3549.8	100
Biomasa total kg ha ⁻¹	2085.29	24.55	2067.04	24.33	2073.43	24.41	2268.86	26.71	8494.62	100
Promedios totales	834.12	24.08	826.82	24.59	829.37	25.05	907.54	26.28	3397.85	100

Anexo 2. Promedios de biomasa (MS) del estrato árboles de sombra en dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

Variables	Sistema				Total	%
	ABER(ER)	%	ER	%		
Biomasa hojas kg ha ⁻¹	309.21	24.43	956.61	75.57	1265.82	100.00
Biomasa peciolo kg ha ⁻¹	88.46	23.18	293.2	76.82	381.66	100.00
Biomasa RD kg ha ⁻¹	187.04	22.67	637.88	77.33	824.92	100.00
Biomasa RG kg ha ⁻¹	380.31	21.43	1394.59	78.57	1774.9	100.00
Biomasa total kg ha ⁻¹	965.02	22.72	3282.29	77.28	4247.31	100.00
Promedios Totales	386.01	22.89	1312.91	77.11	1698.92	100

Anexo 3. Medias de los componentes de la variable nódulos en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

Sistema x Manejo: Poro (Poro)						
Variables	Sistema	Manejo				Valor de P
		AC	MC	MO	BO	
%Nódulos Activos	ABER(ER)	46.25 ± 12.78 ab	60.92 ± 12.78 b	20.68 ± 12.78 a	56.43 ± 12.78 ab	0.6075
	ER	52.09 ± 12.78 ab	51.65 ± 12.78 ab	45.92 ± 12.78 ab	61.25 ± 12.78 b	0.6075
%Nódulos Inactivos	ABER(ER)	3.75 ± 6.3 a	5.75 ± 6.3 a	29.32 ± 6.3 b	10.23 ± 6.3 a	0.112
	ER	14.58 ± 6.3 ab	15.01 ± 6.3 ab	12.42 ± 6.3 ab	13.75 ± 6.3 ab	0.112
Biomasa NA (g)	ABER(ER)	0.46 ± 0.16 a	0.65 ± 0.16 a	0.31 ± 0.16 a	0.69 ± 0.16 a	0.7392
	ER	0.66 ± 0.16 a	0.55 ± 0.16 a	0.42 ± 0.16 a	0.61 ± 0.16 a	0.7392
Biomasa NI (g)	ABER(ER)	0.13 ± 0.12 a	0.35 ± 0.12 a	0.38 ± 0.12 a	0.32 ± 0.12 a	0.2851
	ER	0.43 ± 0.12 a	0.34 ± 0.12 a	0.23 ± 0.12 a	0.38 ± 0.12 a	0.2851

Anexo 4. Medias de los componentes de la variable biomasa en residuos de poda (kg ha^{-1}) en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

Sistema x Manejo: (Cashá + Poró)(Poró)						
Variables	Sistema	Manejo				Valor de P
		AC	MC	MO	BO	
Biomasa hojas kg ha^{-1}	ABER(ER)	375.76 ± 117.43 a	279.66 ± 117.43 a	348.59 ± 117.43 a	232.82 ± 117.43 a	0.7903
	ER	970.84 ± 117.43 b	886.01 ± 117.43 b	942.55 ± 117.43 b	1027.05 ± 117.43 b	0.7903
Biomasa peciolo kg ha^{-1}	ABER(ER)	85.34 ± 42.57 a	93.58 ± 42.57 a	100.69 ± 42.57 a	74.26 ± 42.57 a	0.8059
	ER	290.41 ± 42.57 b	250.62 ± 42.57 b	320.29 ± 42.57 b	311.53 ± 42.57 b	0.8059
Biomasa RD kg ha^{-1}	ABER(ER)	126.51 ± 108.79 a	217.36 ± 108.79 ab	245.74 ± 108.79 ab	158.54 ± 108.79 a	0.6692
	ER	499.68 ± 108.79 bc	774.05 ± 108.79 c	584.14 ± 108.79 c	693.65 ± 108.79 c	0.6692
Biomasa RG kg ha^{-1}	ABER(ER)	308.98 ± 255.95 a	346.72 ± 255.95 a	522.9 ± 255.95 ab	342.65 ± 255.95 a	0.4312
	ER	1513.08 ± 255.95 c	1286.09 ± 255.95 c	1081.95 ± 255.95 bc	1697.24 ± 255.95 c	0.4312

Anexo 5. Medias de los componentes de la variable aporte de nutrientes en residuos de poda (kg ha^{-1}) en los manejos AC, MC, MO y BO bajo dos sistemas de sombra en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

Sistema x Manejo: (Cashá + Poró) = (Poró)						
Variables	Sistema	Manejo				Valor de P
		AC	MC	MO	BO	
Total Ca kg ha^{-1}	ABER(ER)	6.73 ± 2.46 a	5.54 ± 2.46 a	7 ± 2.46 a	4.72 ± 2.46 a	0.7537
	ER	19.73 ± 2.46 b	17.65 ± 2.46 a	18.5 ± 2.46 a	21.15 ± 2.46 a	0.7537
Total Mg kg ha^{-1}	ABER(ER)	1.54 ± 0.61 a	1.31 ± 0.61 a	1.68 ± 0.61 a	1.13 ± 0.61 a	0.7143
	ER	4.76 ± 0.61 b	4.23 ± 0.61 b	4.35 ± 0.61 b	5.13 ± 0.61 b	0.7143
Total K kg ha^{-1}	ABER(ER)	10.44 ± 4.76 a	9.53 ± 4.76 a	12.53 ± 4.76 a	8.43 ± 4.76 a	0.6503
	ER	35.68 ± 4.76 b	31.32 ± 4.76 b	31.31 ± 4.76 b	38.83 ± 4.76 b	0.6503
Total P kg ha^{-1}	ABER(ER)	1.82 ± 0.75 a	1.58 ± 0.75 a	2.05 ± 0.75 a	1.38 ± 0.75 a	0.6907
	ER	5.8 ± 0.75 b	5.13 ± 0.75 b	5.22 ± 0.75 b	6.27 ± 0.75 b	0.6907
Total N kg ha^{-1}	ABER(ER)	23.87 ± 8.64 a	19.36 ± 8.64 a	24.72 ± 8.64 a	16.56 ± 8.64 a	0.7362
	ER	69.54 ± 8.64 b	62.34 ± 8.64 b	64.5 ± 8.64 b	74.54 ± 8.64 b	0.7362

Anexo 6. ANAVA para el componente % nódulos activo bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF con café, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.15	2	0.07	0.32	0.1767ns
Sistema	0.01	1	0.01	0.05	0.7155ns
Error (a)	0.45	2	0.22		
Manejo	0.28	3	0.09	2.25	0.0859ns
Muestreo	0.01	3	0.0047	0.12	0.9524ns
Sistema*Manejo	0.36	3	0.12	3.00	0.0402*
Error (b)	3.36	81	0.04		
Total	4.62	95			

Log10=0.27

CV=10.66

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 7. ANAVA para el componente biomasa de nódulos activos en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.09	2	0.04	2.23	0.6545ns
Sistema	0.01	1	0.01	0.06	0.7566ns
Error (a)	0.34	2	0.17		
Manejo	0.31	3	0.10	1.00	0.3837ns
Muestreo	0.03	3	0.01	0.10	0.9628ns
Sistema*Manejo	0.11	3	0.04	0.40	0.7741ns
Error (b)	8.21	81	0.10		
Total	9.09	95			

R²= 0.10

CV=35.75

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 8. ANAVA para el componente biomasa seca hojas (kg ha⁻¹) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.13	2	0.06	2	0.1904ns
Sistema	4.79	1	4.79	159.66	<0.0001**
Error (a)	0.06	2	0.03		
Manejo	0.16	3	0.05	1.25	0.2325ns
Muestreo	0.07	3	0.02	0.50	0.6055ns
Sistema*manejo	0.28	3	0.09	2.25	0.0663ns
Error (b)	3.01	81	0.04		
Total	8.48	95			

Log10= 0.65

CV=7.16

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 9. ANAVA para el componente biomasa seca de peciolo (kg ha⁻¹) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.02	2	0.01	1.00	0.7703ns
Sistema	5.29	1	5.29	52.9	<0.0001**
Error (a)	0.19	2	0.10		
Manejo	0.07	3	0.02	0.52	0.6702ns
Muestreo	0.04	3	0.01	0.25	0.8252ns
Sistema*manejo	0.12	3	0.04	1.00	0.4537ns
Error (b)	3.63	81	0.04		
Total	9.36	95			

Log10= 0.61

CV=9.82

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 10. ANAVA para el componente biomasa seca de rama delgada (RD) (kg ha^{-1}) bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.29	2	0.14	0.67	0.1153ns
Sistema	5.65	1	5.65	27	<0.0001**
Error (a)	0.43	2	0.21		
Manejo	0.38	3	0.13	2.17	0.1277ns
Muestreo	0.12	3	0.04	0.66	0.5929ns
Sistema*manejo	0.35	3	0.12	2	0.153ns
Error (b)	5.22	81	0.06		
Total	12.44	95			

Log10= 0.58

CV=10.36

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 11. ANAVA para el componente biomasa seca de rama gruesa (RG) (kg ha^{-1}) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.02	2	0.01	0.05	0.8515ns
Sistema	6.36	1	6.36	35.33	<0.0001**
Error (a)	0.37	2	0.18		
Manejo	0.12	3	0.04	0.57	0.6507ns
Muestreo	0.01	3	0.004	0.05	0.9837ns
Sistema*manejo	0.57	3	0.19	2.71	0.0632ns
Error (b)	6.04	81	0.07		
Total	13.48	95			

Log10= 0.55

CV=9.85

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 12. ANAVA para aportes totales (kg ha^{-1}) de Ca bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.06	2	0.03	0.5	0.4427ns
Sistema	5.02	1	5.02	83.67	<0.0001**
Error (a)	0.11	2	0.06		
Manejo	0.13	3	0.04	1	0.3508ns
Muestreo	0.05	3	0.02	0.5	0.7048ns
Sistema*Manejo	0.21	3	0.07	1.8	0.1531ns
Error (b)	3.16	81	0.04		
Total	8.76	95			

Log10= 0.64

CV=20.05

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 13. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de Mg bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.05	2	0.03	0.43	0.5422ns
Sistema	5.14	1	5.14	73.43	<0.0001**
Error (a)	0.14	2	0.07		
Manejo	0.12	3	0.04	1	0.3922ns
Muestreo	0.05	3	0.02	0.5	0.7455ns
Sistema*Manejo	0.2	3	0.07	1.75	0.1858ns
Error (b)	3.29	81	0.04		
Total	8.98	95			

Log10= 0.63

CV=55.83

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 14. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de K en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.03	2	0.02	0.2	0.7108ns
Sistema	5.36	1	5.36	53.6	<0.0001**
Error (a)	0.19	2	0.1		
Manejo	0.11	3	0.04	1.00	0.4756ns
Muestreo	0.04	3	0.01	0.25	0.8194ns
Sistema*Manejo	0.2	3	0.07	1.75	0.227ns
Error (b)	3.59	81	0.04		
Total	9.52	95			

Log10= 0.62

CV=17.24

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 15. ANAVA para los aportes totales (kg ha^{-1}) de P bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.04	2	0.02	0.25	0.5967ns
Sistema	5.21	1	5.21	65.12	<0.0001**
Error (a)	0.15	2	0.08		
Manejo	0.12	3	0.04	1.00	0.4174ns
Muestreo	0.05	3	0.02	0.5	0.7691ns
Sistema*Manejo	0.2	3	0.07	1.75	0.2000ns
Error (b)	3.38	81	0.04		
Total	9.14	95			

Log10= 0.63

CV=46.2

Test: LSD Fisher

∞ 0.05

Anexo 16. ANAVA para los aportes totales (kg ha⁻¹) de N bajo dos sistemas de sombra en los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.07	2	0.04	0.8	0.4115ns
Sistema	5.02	1	5.02	100.4	<0.0001**
Error (a)	0.11	2	0.05		
Manejo	0.14	3	0.05	1.25	0.3315ns
Muestreo	0.06	3	0.02	0.5	0.6998ns
Sistema*Manejo	0.22	3	0.07	1.75	0.1400ns
Error (b)	3.17	81	0.04		
Total	8.78	95			

Log10= 0.64

CV=12.91

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 17. ANAVA para el componente longitud (cm) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.21	2	0.1	0.43	0.3202ns
Sistema	0.09	1	0.09	0.39	0.3324ns
Error (a)	0.46	2	0.23		
Manejo	0.38	3	0.13	1.44	0.2442ns
Muestreo	0.21	3	0.07	0.78	0.5107ns
Sistema*Manejo	0.5	3	0.17	1.89	0.1453ns
Error (b)	7.26	81	0.09		
Total	9.09	95			

Log10= 0.20

CV=11.85

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 18. ANAVA para el componente área (cm²) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	9.31	2	4.66	9.54	0.2823ns
Sistema	11.09	1	11.09	1.29	0.084*
Error (a)	17.26	2	8.63		
Manejo	28.89	3	9.63	2.66	0.0538ns
Muestreo	10.3	3	3.43	0.95	0.4217ns
Sistema*Manejo	29.22	3	9.74	2.69	0.0519ns
Error (b)	293.55	81	3.62		
Total	399.63	95			

R²= 0.27

CV=32.84

Test: LSD Fisher

∞0.05

Anexo 19. ANAVA para el diámetro (mm) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.04	2	0.02	13.33	0.0057*
Sistema	0.06	1	0.06	40.00	<0.0001**
Error (a)	0.003	2	0.0015		
Manejo	0.04	3	0.01	3.12	0.0053**
Muestreo	0.01	3	0.004	1.25	0.2972ns
Sistema*Manejo	0.03	3	0.01	3.12	0.0206*
Error (b)	0.26	81	0.0032		
Total	0.45	95			

$R^2 = 0.42$

CV=6.46

Test: LSD Fisher

$\alpha = 0.05$

Anexo 20. ANAVA para el volumen (cm³) en dos sistemas de sombra bajo los manejos AC, MC, MO y BO evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0.41	2	0.2	0.36	0.4166ns
Sistema	1.43	1	1.43	2.6	0.0147*
Error (a)	1.11	2	0.55		
Manejo	1.62	3	0.54	2.35	0.0788ns
Muestreo	0.9	3	0.3	1.30	0.2781ns
Sistema*Manejo	1.36	3	0.45	1.96	0.1242ns
Error (b)	18.6	81	0.23		
Total	25.42	95			

$R^2 = 0.27$

CV=33.69

Test: LSD Fisher

$\alpha = 0.05$

Anexo 21. Muestreo de las variable biomasa en residuos de poda para los componentes hojas (figura a), peciolo (figura a), rama delgada y rama gruesa (figura b), bajo los manejos AC, MC, MO y BO en los dos sistemas de sombra evaluados en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica. Peso seco de los componentes de la variable aporte de biomasa (figura c), horno para el secado de hojas, peciolo, RP y RG (figura d).



a



b



c

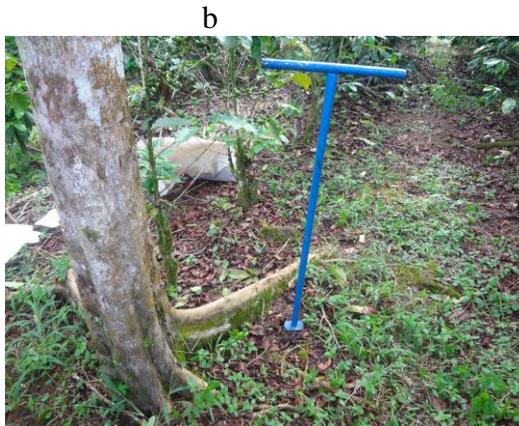


d

Anexo 22. Nódulos *Erythrina poeppigiana* encontrados en el muestreo (figura a), nódulos seco (figura b) después de haber sido extraídos del horno, balanza electrónica (g) para el pesado de nódulos verdes (figura c).



Anexo 23. Herramientas utilizadas en laboratorio y el campo balanza (figura a) y barreno (figura b) en el ensayo de SAF, Turrialba, Costa Rica



Anexo 24. Sistemas de sombra (tratamientos) poró-cashá (figura a) y poró (figura b) evaluados en el ensayo de SAF.

a



b

