



Universidad Nacional Agraria  
Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

## Trabajo de Graduación

Por un Desarrollo  
Agrario Integral  
y Sostenible

Determinación del índice de área foliar,  
radiación solar no interceptada por especies  
forestales y concentración de magnesio en  
hojas de Café (*Coffea arabica* L.) en  
sistemas agroforestales, localizados en  
Masaya, Nicaragua

### AUTORA

**Bra. Jael Bildad Cruz Castillo**

### ASESORES

**Dra. María Carolina Vega**

**Ing. MSc. Edwin Alonzo Serrano**

**Ing. MSc. Rodolfo Munguía Hernández**

Managua, Nicaragua

Julio, 2014



Universidad Nacional Agraria  
Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

## **Trabajo de Graduación**

Trabajo presentado como requisito para obtener el título de  
Ingeniero Forestal

**Determinación del índice de área foliar, radiación  
solar no interceptada por especies forestales y  
concentración de magnesio en hojas de Café  
(*Coffea arabica* L.) en sistemas agroforestales,  
localizados en Masaya, Nicaragua**

### **AUTOR**

Bra. Jael Bildad Cruz Castillo

### **ASESORES**

Dra. María Carolina Vega

Ing. MSc. Edwin Alonzo Serrano

Ing. MSc. Rodolfo Munguía Hernández

Managua, Nicaragua

Julio, 2014




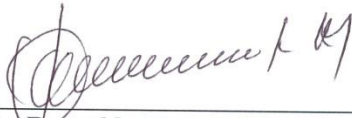
Por un Desarrollo Agrario  
Integral y Sostenible"

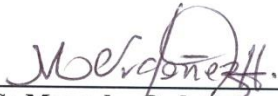
## Universidad Nacional Agraria Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable tribunal examinador designado por la Decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, como requisito parcial para optar al título de

*Ingeniero Forestal*

  
Ing. Claudio Calero González  
*Presidente*

  
MSc. Reynaldo Bismarck Mendoza  
*Secretario*

  
MSc Mercedes Ordoñez  
*Vocal*

Managua, Nicaragua  
28 de Julio del año 2014

## ÍNDICE DE CONTENIDO

No	SECCIÓN	PÁGINA
	<b>DEDICATORIA</b>	i
	<b>AGRADECIMIENTOS</b>	ii
	<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	iii
	<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	iv
	<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	v
	<b>RESUMEN</b>	vi
	<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>II</b>	<b>OBJETIVOS</b>	3
	2.1. Objetivo general	3
	2.2. Objetivos específicos	3
<b>III</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	4
	3.1. Localización del área de estudio	4
	3.1.1. Réplica El Mamón y El Níspero	4
	3.1.2. Réplica Campos Azules	5
	3.2. Diseño metodológico	5
	3.2.1. Muestreo de campo	7
	<i>Inventario de árboles y medición de variables dendrométricas</i>	7
	<i>Muestreo para determinar Índice de área foliar</i>	9
	<i>Muestreo para determinar radiación no interceptada por los árboles de sombra</i>	12
	<i>Muestreo para determinar concentración de Mg en las hojas de Café</i>	13
	3.2.2. Caracterización Etnobotánica de las especies forestales presentes en el Ensayo	14
	3.3. Análisis de datos	16
<b>IV</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	17
	4.1. Estructura vegetal del sistema agroforestal con Café	17
	4.2. Determinación del índice de área foliar (IAF) de los árboles mediante el método destructivo	20
	4.2.1. Calibración de área foliar utilizando LI-3100	20
	4.2.2. Índice de área foliar (IAF) de los árboles	21
	4.3. Determinación del IAF de los árboles mediante Fotografías hemisféricas (Método no destructivo)	23
	<i>Predicción del IAF a partir de ecuación alométrica</i>	25
	4.4. Radiación solar incidente sobre el follaje de las plantas de Café (luminosidad no interceptada en el SAF)	27
	4.5. Contenido de magnesio en hojas de Café	29
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	32
<b>VI</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	33
<b>VII</b>	<b>LITERATURA CITADA</b>	34
<b>VIII</b>	<b>ANEXOS</b>	37

## **DEDICATORIA**

A **Dios** dador de la vida quien me iluminó cada día dándome la oportunidad de triunfar y la fuerza necesaria para superar los obstáculos durante el transcurso de esta carrera.

A mi Madre **Aurabelia Castillo** por su apoyo incondicional, a mi Padre **Eleuterio Cruz**, a mi hermana **Jackeline Cruz** quienes en todo momento estuvieron a mi lado y me dieron aliento para culminar con éxito esta etapa universitaria.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme sabiduría, inteligencia y conocimientos durante mi formación profesional.

A mi Madre **Aurabelia Castillo** por luchar hasta el final para darme lo mejor, a mi Padre **Eleuterio Cruz**, a mi hermana **Jackeline Cruz** quienes me brindaron su apoyo, cariño y comprensión.

A **Dra. María Carolina Vega, Ing. MSc. Edwin Alonzo, Ing. MSc. Rodolfo Munguía** por compartir sus conocimientos, por su apoyo, paciencia y por ser excelentes guías en este trabajo de investigación.

A la honorable Alma Máter, **Universidad Nacional Agraria** y todo su personal quienes me brindaron la oportunidad, las herramientas y los conocimientos para desarrollarme profesionalmente.

A **María Padovan, Víctor Jirón, Ledis Navarrete, Elvin Navarrete, Mauricio Martínez, Alejandro Aguirre, Dimas Aguilar** por su valiosa colaboración durante la etapa de campo del estudio. A los comités **CATIE/INTA/CENECOOP/UNA** y **CAFADAPT/FONTAGRO/UNA** por ser los precursores de este proyecto y por su apoyo económico en el desarrollo de esta investigación.

A las señoras **Dora Díaz, Adilia Lanuza** y sus respectivas familias por el apoyo incondicional brindado a lo largo de los años.

Gracias

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1	Combinación de especies forestales y descripción de los tratamientos en las parcelas principales y en las sub parcelas	6
2	Densidad de árboles por hectárea (ha) por subparcela y sistema de sombra	17
3	Diámetro normal(DN) y altura total de árboles por especie y su Incremento Medio Anual (IMA), área basal (m <sup>2</sup> ) y volumen de madera (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	19
4	Ecuaciones de calibración de área foliar (cm <sup>2</sup> ) por hoja y especie	20
5	Valores de índices de área foliar (IAF) de <i>T. rosea</i> obtenidos por el método destructivo	22
6	Valores de índices de área foliar (IAF) de <i>Inga laurina</i> , <i>Samanea saman</i> y <i>Simarouba glauca</i> obtenidos por el método destructivo	22
7	Valores de índices de área foliar (IAF) de <i>Inga laurina</i> , <i>Samanea saman</i> y <i>Simarouba glauca</i> obtenidos por el método no destructivo (Fotografías hemisféricas)	24
8	Ecuaciones alométricas usadas para estimar el índice de área foliar (IAF)	25
9	Valores de IAF para las especies tropicales <i>Inga laurina</i> , <i>Samanea saman</i> y <i>Simarouba glauca</i> obtenidos al aplicar las ecuaciones alométricas	26
10	Valores de IAF alométrico para <i>Tabebuia rosea</i>	26
11	Concentración de Magnesio en hojas de Café y su relación con pH del suelo	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Localización del municipio de Masatepe donde se ubican los sitios experimentales CENECOOP y CECA. Fuente: Velásquez y González (2012)	5
2	Diseño inicial y frecuencia de los raleos realizados (2000 a 2013) en las parcelas del Ensayo de Sistemas.	7
3	Puntos de medición de entrada de radiación solar sobre las plantas de Café	13
4	Ecuación de calibración de área foliar (AF) para todas las especies	21
5	Radiación incidente sobre el follaje de las plantas de Café en SAF con Café. Réplica II CENECOOP, 2013.	28
6	Hojas de <i>S. saman</i> afectadas por antracnosis	29
7	Hojas de <i>I. laurina</i> afectadas por antracnosis	29



## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO		PÁGINA
1	Ensayo experimental. Réplica El Mamón, Jardín botánico, Masatepe	38
2	Ensayo experimental. Réplica Campos Azules, Masatepe	39
3	Estrategia metodológica del estudio	40
4	Árboles de sombra por especie en cada subparcela en áreas de CENECOOP	41
5	Árboles de sombra por especie en cada subparcela en áreas de CECA	42
6	Valores de DN, Altura, Área basal y Volumen de las especies inventariadas en CENECOOP y CECA	42
7	Valores de Coeficiente de secado ( $k$ ) de <i>Inga laurina</i> , <i>Samanea saman</i> , <i>Simarouba glauca</i> y <i>Tabebuia rosea</i>	43
8	Manejo de la fertilidad del suelo en el Ensayo de sistemas agroforestales con Café, Masatepe	44

## RESUMEN

La presente investigación se realizó en sistemas agroforestales con Café (*Coffea arabica* L.) en el Municipio de Masatepe, Nicaragua, determinando el índice de área foliar, radiación solar no interceptada por especies forestales y concentración de magnesio en hojas de Café. Para determinar índice de área foliar se utilizó una metodología no destructiva y una destructiva; la medición no destructiva se basó en la técnica de fotografías hemisféricas para lo cual se utilizó una cámara Nikon Coolpix 4500 que permitió tomar fotografías de cuatro árboles de *Samanea saman*, *Inga laurina*, *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea* respectivamente. Por cada árbol se tomaron cuatro imágenes sobre lados opuestos del tronco (Norte, Sur, Este y Oeste), para el análisis de fotografías hemisféricas se empleó el software Gap Light Analyzer. Para contrastar la medición de índice de área foliar por método no destructivo (fotografías hemisféricas) se empleó un método destructivo basado en la recolección de 300 hojas, se tomó el peso húmedo del total de hojas de cada uno de los árboles en estudio. Del total de hojas de cada árbol se pesaron separadamente tres muestras; utilizando el planímetro LI-3000 se calculó en cada caso el área de la hoja. Una vez obtenida el área foliar de la hoja, las muestras se secaron en horno a 65° C, durante 72 h y promediadas para obtener biomasa del follaje. Dividiendo el área foliar de las muestras entre su peso seco se obtuvo el área foliar específica, posteriormente el promedio de área foliar específica de las muestras multiplicado por el peso seco total de hojas permitió calcular el área foliar del árbol. Finalmente, se obtuvo el índice de área foliar dividiendo área foliar entre el área de suelo asignada. La medición de la cantidad de radiación incidente sobre el follaje de las plantas de Café se realizó en la réplica II en CENECOOP en dos puntos de muestreo; el criterio de selección de los sitios se basó en la combinación de árboles ubicados diagonalmente y en la uniformidad de distancia entre las especies para la combinación *T. rosea* + *S. glauca* e *I. laurina* + *S. saman*. En esta réplica se realizaron análisis del contenido de magnesio en hojas de Café en las subparcelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 más dos muestras testigos en las subparcelas 13 y 14 a pleno sol. El índice de área foliar promedio para especies tropicales estimado por el método destructivo fue de 2,52 y por el método no destructivo fue de 0,85; debido a estas diferencias es necesario aplicar un factor de corrección o calibración al método no destructivo para validar ambos resultados. En la combinación *I. laurina* + *S. saman* se detectó un mayor paso de radiación solar al cafetal (29911,11 lux) posiblemente debido a las características morfológicas del dosel. La concentración de magnesio más alta es de 2% la cual se encontró en las hojas de Café de la combinación *T. rosea* + *S. glauca* en nivel de insumo orgánico moderado.

**Palabras claves:** *Samanea saman*, *Inga laurina*, *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, fotografías hemisféricas.

## ABSTRACT

This research was conducted in agroforestry systems of coffee (*Coffea arabica* L.) located in the Municipality of Masatepe, Nicaragua, the objective of this study was to estimate LAI, forest species not intercepted solar radiation and concentration of magnesium in coffee leaves. Destructive and non-destructive methods were used to determine LAI. Hemispherical canopy photography is a non-destructive technique; in each sample unit four photographs were taken using a digital Nikon Coolpix 4500 camera which allowed plant canopies of four trees of *Samanea saman*, *Inga laurina*, *Simarouba glauca* and *Tabebuia rosea* respectively. For each tree were taken four pictures regarding opposite sides of the trunk (North, South, East and West) and the LAI was calculated with the software Gap Light Analyzer. The results obtained were tested using destructive method in brief were weighed the total number of leaves from four trees of each tree species in the plot. From the leaf bulk of each tree were separated three samples to weigh and measure leaf by leaf in order to obtain the leaf area. Leaf area was measured using the scanning planimeter LI-3000. Once obtained the green leaf area by a planimetric technique, the sample was dried in an oven at 65 ° C for 72 h and averaged to obtain biomass foliage. The results allowed calculate the specific leaf area; the samples average multiplied for the total of leaves dry weight allowed calculate the leaf area of the tree. The ratio between the leaf area and the samples dry weight was used to obtain specific leaf area and then the average specific leaf area multiplied by the total dry weight of leaves allowed to calculate the leaf area of the tree. Finally, leaf area index was obtained as the total leaf area per unit of land. The amount of radiation incident on the foliage of plants of coffee were held at CENECOOP replica II the criterion of selection of two sampling points sites was based on the combination of trees located diagonally plus the uniformity of distance between species for the combination *T. rosea* + *S. glauca* and *I. laurina* + *S. saman*. In this site magnesium content in coffee leaves subplots 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 and control subplots 13 and 14 were achieved. The average leaf area index for tropical species estimated by the destructive method was 2.52 and the non-destructive method was 0.85; Because of these differences it is necessary to apply a correction factor or calibration to non-destructive method. In the combination *I. laurina* + *S. saman* was detected the higher amount of not intercepted solar radiation (29911.11 lux) it is possibly due to the morphological characteristics of the canopy. The highest concentration of magnesium was 2% which was found in the leaves of coffee trees from the combination *T. rosea* + *S. glauca* in moderate level of organic input.

**Keywords:** *Samanea saman*, *Inga laurina*, *Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, hemispherical photographs.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF) son una forma de uso de la tierra donde se combinan o interactúan árboles con cultivos agrícolas (anuales o perennes), en función del tiempo y del espacio, para incrementar y optimizar la producción en forma sostenida. La clasificación de los sistemas agroforestales es necesaria para evaluarlos y desarrollar planes de manejo del sistema productivo. Una forma usual de clasificación de los sistemas agroforestales puede basarse en el tipo de componentes incluidos y en la asociación espacial y temporal que existe entre los componentes (Arcila *et al.*, 2007).

Esta clasificación es descriptiva y al nombrar cada sistema (secuenciales, simultáneos, cercas vivas, cortinas rompevientos), se obtiene una idea de los componentes, de su morfología y sus principales funciones. De manera que por su complejidad los SAF requieren una mayor comprensión de las interacciones no sólo biológicas sino también las sociales que en el ocurren.

El objetivo principal de los SAF simultáneos es la diversificación de la producción, aunque también pueden lograrse aumentos en la productividad a través de algunas interacciones con el componente arbóreo. El cultivo del Café constituye la base para muchos sistemas simultáneos, los componentes agrícolas y arbóreos se encuentran en el mismo terreno durante toda la duración del sistema; la función y utilidad de los árboles son claramente mucho más significativas que el dar sombra puesto que éstos contribuyen a una recirculación más eficiente de la materia y la energía en el sistema.

En SAF con Café la importancia relativa y el efecto de las diferentes interacciones entre los árboles de sombra y el Café dependen de las condiciones del sitio (suelo y clima), la selección del genotipo (especie, variedad y procedencia), las características bajo y sobre el suelo de los árboles y el cultivo, así como de las prácticas de manejo del cultivo principal.

Es fundamental contar con un mayor conocimiento para profundizar en estudios eco-fisiológicos que conducirán a un mejor manejo de los SAF lo cual es estratégico para fortalecer las potencialidades de estos sistemas productivos como elementos de resiliencia a los efectos del cambio climático, principalmente relacionados a la dinámica hídrica y de temperaturas.

Un buen descriptor de los procesos fisiológicos (fotosíntesis, transpiración, movimiento de nutrientes, interceptación de la lluvia, crecimiento y productividad) de las plantas es el índice de área foliar (IAF), proporción de hojas que cubren la proyección de ellas en el suelo. Adicionalmente, la cantidad de radiación que entra a la plantación determina la tasa fotosintética del cultivo, su crecimiento, su demanda de nutrientes y de agua, la dinámica de plagas y enfermedades y eventualmente, la producción comercial (Castillo *et al.*, 1997).

Tradicionalmente se han utilizado métodos destructivos y no destructivos para estimar IAF. Utilizando un medidor de superficie foliar (LI 3000) es posible calcular esta variable mediante la medición directa de hojas. En cambio la toma y uso de las fotografías hemisféricas con apoyo del software Gap Light Analyzer (GLA) permiten obtener índice sin eliminar el árbol (Jonckheere *et al.*, 2004).

En Nicaragua, las investigaciones con SAF son aún insuficientes y no fue posible encontrar en la literatura estudios acerca de interceptación de la radiación solar y su relación con el área foliar en sistemas con Café.

## II. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

- ✓ Determinar índice de área foliar, radiación solar no interceptada por especies forestales y concentración de magnesio en hojas de Café (*Coffea arabica* L.) en sistemas agroforestales, localizados en Masaya, Nicaragua

### 2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el crecimiento y estratificación ecológica de las especies forestales asociadas con Café (*Coffea arabica* L.), localizado en Masaya.
2. Determinar el Índice de Área Foliar (IAF) de *Simarouba glauca* DC, *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *Inga laurina* (Sw) Willd. y *Samanea saman* (Jacq.) Merr, a través del método destructivo directo y el uso de fotografía hemisférica.
3. Estimar la intensidad lumínica no interceptada por las especies forestales como sombra para el cultivo de Café.
4. Determinar a través de análisis de laboratorio la concentración de magnesio en las hojas de Café.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del área de estudio

El presente trabajo, se desarrolló en el municipio de Masatepe, ubicado a 53 km de Managua, comprende una extensión territorial de 62 km<sup>2</sup> y una población total de 28,778 habitantes; sus principales actividades están en los sectores agropecuarios y en la comercialización de artesanías (INIFOM, 2000).

El área experimental está conformada por dos repeticiones establecidas en el Centro Nacional de Estudios de Cooperativismo (CENECOOP), antes conocido como Centro Jardín Botánico; una tercera repetición ubicada en el Centro de desarrollo tecnológico Campos Azules (Figura 1). Dichas repeticiones forman parte del proyecto de investigación interinstitucional ejecutado por INTA, CARUNA (antes UNICAFE), UNA y CATIE a largo plazo, ejecutado desde el 2000 denominado Sostenibilidad y sinergismo: un estudio de interacciones entre plagas, la fertilidad y el estrato arbóreo.

##### 3.1.1. Réplicas El Mamón y El Níspero

Se encuentran ubicadas en el Centro Nacional de Estudios de Cooperativismo (CENECOOP) en el Municipio de Masatepe, perteneciente a la Caja Rural Nacional (CARUNA) en las coordenadas 11°54' Latitud Norte y 86°09' Longitud Oeste, con una elevación de 455 msnm, con suelos fértiles; pH de 5.7 a 6.0; materia orgánica de 10 a 12% y CIC de 54 a 57%, con una precipitación promedio anual de 1,400 mm, temperatura media anual de 24 grados centígrados y una humedad relativa entre 70 - 80 % (Blanco *et al.*, 2003).

Los suelos han sido caracterizados como predominantemente Andisoles, típicamente este tipo de suelo presenta alto contenido de materia orgánica, baja densidad, alta capacidad de fijación de fósforo, alto contenido alófono, alto contenido de minerales amorfos y alta capacidad de retención de agua. Es necesario mencionar que en el sitio existe una capa característica de Talpetate, es decir posee un horizonte endurecido (Salgado y Olivera, 2003).

### 3.1.2. Réplica Campos Azules

Se encuentra ubicada en área del Centro de Desarrollo Tecnológico de Campos Azules en el Municipio de Masatepe, perteneciente del Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) en las coordenadas 12° 19' latitud Norte y 86° 04' longitud Oeste, con una elevación de 490 msnm, suelos fértiles de origen volcánico, con topografía plana, presenta un alto contenido de materia orgánica y acidez de 5 a 6 pH (Chavarría y Hernández, 2007).



Figura 1. Localización del municipio de Masatepe donde se ubican los sitios experimentales CENECOOP y CECA. Fuente: Velásquez y González (2012)

### 3.2. Diseño metodológico

Los tratamientos del Ensayo de sistemas agroforestales en el que se realizó este estudio fueron establecidos en el año 2000 para las réplicas I y II, ubicadas en el Centro Nacional de Estudios de Cooperativismo (CENECOOP). La réplica III, fue establecida en el 2001 en el Centro Desarrollo Tecnológico de Campos Azules.



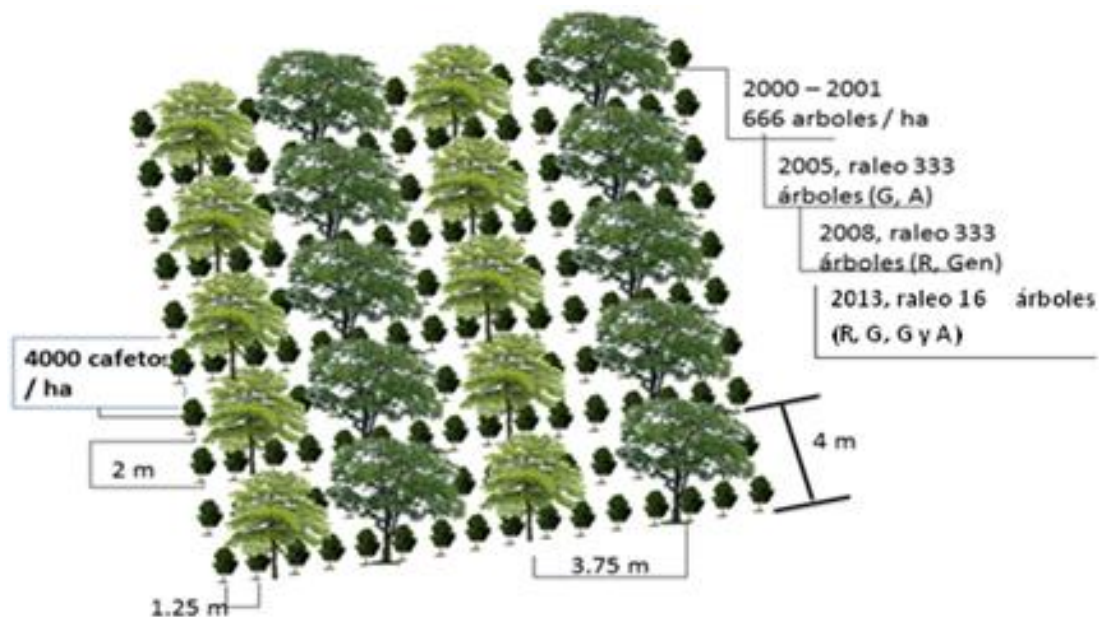
Se establecieron 14 tratamientos distribuidos aleatoriamente en cada una de las repeticiones, en un Diseño en Parcelas Divididas no balanceado (Anexo 1 y 2); sin embargo este estudio no sigue el sistema de análisis del modelo estadístico, sino de acuerdo a los objetivos planteados. El factor A, combinaciones de árboles de sombra, fueron establecidas en las parcelas grandes; siendo estas *Inga laurina* + *Samanea saman*; *Inga laurina* + *Simarouba glauca*; *Tabebuia rosea* + *Samanea saman* y *Tabebuia rosea* + *Simarouba glauca*. El factor B, niveles de insumos fueron distribuidos en las subparcelas (Anexo 8), sin embargo, no todos ellos forman las combinaciones de tratamientos por lo que da origen a un diseño no balanceado (Cuadro 1).

Cuadro 1. Combinación de especies forestales y descripción de los tratamientos en las parcelas principales y en las sub parcelas

Parcela principal		Sub parcela	
Especie de sombra	Descripción	Nivel de insumo	Descripción
IL SG	<i>Inga laurina</i> y <i>Simarouba glauca</i> (Guabillo y acetuno)	CM	Convencional Moderado
		OI	Orgánico Intensivo
SS TR	<i>Samanea saman</i> y <i>Tabebuia rosea</i> (Genízaro y Roble)	CM	Convencional Moderado
		OI	Orgánico Intensivo
SSIL	<i>Samanea saman</i> e <i>Inga laurina</i> (Genízaro y Guabillo)	CI	Convencional Intensivo
		OI	Orgánico Intensivo
		CM	Convencional Moderado
		OM	Orgánico moderado
SG TR	<i>Simarouba glauca</i> y <i>Tabebuia rosea</i> (Acetuno y Roble)	CI	Convencional Intensivo
		OI	Orgánico Intensivo
		CM	Convencional Moderado
		OM	Orgánico moderado
Pleno sol	Pleno sol	CI	Convencional Intensivo
		CM	Convencional Moderado

Las subparcelas fueron establecidas con el objetivo de evaluar las interacciones entre diversas especies de sombra y diferentes niveles y tipos de insumos para el manejo de plagas y la nutrición en sistemas agroforestales con Café. Las plantas de Café de la variedad Pacas, fueron establecidas a una distancia de 2 metros entre surco y 1.25 metros entre planta para una población inicial de 4000 plantas por hectárea. En cambio el distanciamiento inicial para los árboles fue de 4 metros entre surco y 3.75 metros entre árbol para una población de 666 plantas por hectárea.

Desde el establecimiento del cafetal en el año 2000 a la actualidad (2013), se han realizado modificaciones relacionadas con el manejo de la sombra en el cafetal; en el año 2005 se realizó el primer raleo de 333 árboles de las especies *Inga laurina* y *Simarouba glauca*; en el año 2008 se raleó 333 árboles de las especies *Tabebuia rosea* y *Samanea saman*; en el año 2013 se raleó 16 árboles 4 individuos de cada especie (*Tabebuia rosea*, *Samanea saman*, *Inga laurina* y *Simarouba glauca*) (Figura 2).



### 3.2.1. Muestreo de campo

#### *Inventario de árboles y medición de variables dendrométricas*

Para seleccionar los árboles en estudio se realizó un inventario total de las especies, tomando en cuenta aquellos árboles que presentaron un Diámetro normal (DN) igual o mayor a 10 centímetros. Luego se organizó la base de datos por especie y se seleccionaron dos individuos del extremo mayor (30-40 cm) de DN encontrados y dos individuos del extremo menor (10-20 cm de DN), tomando así cuatro árboles por especie. Posteriormente se marcaron con cinta biodegradable la que llevó dos códigos: nombre común del árbol y número de árbol.

El inventario al 100% se realizó en 8 subparcelas de la Réplica El Mamón ubicada en CENECOOP, donde 4 subparcelas presentaban la combinación *Inga laurina* + *Samanea saman* y 4 subparcelas la combinación *Tabebuia rosea* + *Simarouba glauca*. En cambio en CECA se inventariaron 4 subparcelas al 100%, de las cuales 2 pertenecían a la combinación *Inga laurina* + *Simarouba glauca*, 1 subparcela *Inga laurina* + *Samanea saman* y 1 subparcela con la combinación *Tabebuia rosea* + *Samanea saman*. Para un total de 12 subparcelas inventariadas.

Las variables dendrométricas consideradas en el inventario fueron: Diámetro normal, Diámetro de copa y Altura total. Para medir el DN se utilizó una cinta diamétrica, para tomar el diámetro de copa se utilizó una cinta métrica y se usó una vara telescópica para tomar altura total.

Para obtener el Número de árboles por hectárea (Nº árb/ha), Área basal (AB/ha) y Volúmen por hectárea (Vol/ha) se aplicaron las siguientes fórmulas tomadas de (Imañe, 2008):

1. Número de árboles por hectárea (Nº árb/ha) =  $\frac{1}{T_p * C_p} \sum \text{árb}$
2. Área basal/ ha (AB/ha) =  $\frac{1}{T_p * C_p} \sum AB$
3. Volúmen/ha (Vol/ha) =  $\frac{1}{T_p * C_p} \sum \text{árb}$

**T<sub>p</sub>**: Tamaño de parcelas;

**C<sub>p</sub>**: Cantidad de parcelas

En relación al cálculo del incremento o crecimiento medio anual (IMA) de las especies forestales, se tomaron las mediciones del crecimiento de diámetro y altura; este cálculo estuvo basado en la aplicación de la siguiente fórmula sugerida por (Imañe, 2008):

$$IMA_{\text{altura}} = \frac{H}{\text{edad de la especie}} \quad IMA_{\text{DN}} = \frac{DN}{\text{edad de la especie}}$$

Para hacer los cálculos de IMA se utilizaron los datos promedio de DN y altura.

### ***Muestreo para determinar Índice de área foliar***

#### a) Índice de área foliar de árboles de sombra por método destructivo

Para medir el área foliar de los árboles se utilizó un método destructivo, en el cual el área de la hoja fue calculada por la combinación de técnicas planimétricas (mediciones de la hoja) y gravimétricas (peso de las hojas) (Jonckheere *et al.*, 2004). Estas mediciones se efectuaron en el período comprendido entre julio 2013 hasta noviembre 2013. Se estimó el Índice de área foliar de cuatro árboles por especie (*Simarouba glauca*, *Tabebuia rosea*, *Inga laurina* y *Samanea saman*).

Los árboles seleccionados fueron talados (corte a ras del suelo) se procedió a separar todas las hojas de cada uno de los árboles las que fueron puestas en bolsas plásticas negras, las que se pesaron en fresco en una balanza digital 3S/New Su-15. Del total de hojas recolectadas por árbol se obtuvieron tres muestras de 100 hojas cada una; se tomó el peso fresco de cada muestra. Para cada una de las hojas de las respectivas muestras se procedió a medir su área utilizando un planímetro digital LI-3000.

Posterior a la determinación del área foliar de la hoja, la muestra se secó en un horno durante 72 horas a una temperatura promedio de 65 °C, luego se extrajeron las muestras del horno y se tomó el peso seco de ellas para obtener la biomasa seca del follaje. El peso seco total se estimó mediante un coeficiente que relaciona el peso seco/peso húmedo.

En agosto 2013, fue posible disponer de un instrumento moderno el LI-3100 y se decidió calibrar las mediciones realizadas en campo en el LI-3000. Para ello se tomaron 10 hojas de cada especie forestal en estudio, se midieron con ambos instrumentos y posteriormente se correlacionaron, tomándose la decisión de obtener una ecuación de calibración general para todas las especies considerando los 40 datos de área foliar y una ecuación por especie donde solo se toman en cuenta los 10 datos de área foliar de la especie.

Los resultados permitieron calcular el Área Foliar Específica (AFE), que representa el índice de translocación de materia seca por unidad de área foliar. Para esto fue utilizada la fórmula propuesta por Jonckheere *et al.*, 2004:

$$AFE = \frac{AF}{PS}$$

AFE= Área Foliar Específica (cm<sup>2</sup>/g), AF = Área foliar (cm<sup>2</sup>), PS = Peso seco (g)

El promedio de AFE de las muestras multiplicado por el total de hojas de peso seco (PSt) permitió calcular el área de la hoja del árbol por la ecuación propuesta por Jonckheere *et al.*, 2004:

$$AF = (PSt * AFEt)$$

PSt= Peso seco total (g)

Debido a dificultades en mantener constante la temperatura en el secado de las muestras de hojas, se procedió a calibrar el peso seco de dichas muestras empleando un coeficiente de secado (k) para cada muestra, utilizando la metodología de Arreaga (2002).

$$k = Ps/Pf$$

k = Relación entre peso seco y peso húmedo

Ps = Promedio de peso seco

Pf = Promedio de peso fresco

Posteriormente se obtuvo el Índice de área foliar (IAF) a través de la ecuación:

$$IAF = \frac{AF}{AS}$$

IAF= Índice de área foliar AF = Área foliar (m<sup>2</sup>), AS= Área de suelo asignada (m<sup>2</sup>)

b) Índice de área foliar por método no destructivo (fotografías hemisféricas)

La medición no destructiva se basa en la técnica de las Fotografías hemisféricas utilizando una cámara fotográfica Nikon Coolpix 4500 y un auto nivelador (trípode) con un lente hemisférico Nikon Fisheye conveter FC-E8 (0.21x). La cámara fotográfica puesta en el trípode, a una altura de 1.70 m sobre el nivel del suelo para la toma de las imágenes. A partir del punto Norte del árbol se tomaron cuatro fotografías en los lados cardinales opuestos del tronco (Norte, Sur, Este y Oeste). Las imágenes se tomaron bajo condiciones de cielo completamente cubierto de nubes, a fin de optimizar el contraste entre el follaje y el cielo. Las tomas se hicieron en horas del amanecer (5 a 6 am) del día y por el atardecer (4 a 6 pm).

Las imágenes tomadas fueron realizadas en el mes de Julio 2013 en dos árboles de cada una de las especies en estudio (*I. laurina*, *S. saman*, *S. glauca* y *T. rosea*) ubicados en CENECOOP; otros dos árboles de las mismas especies, excepto *T. rosea*, fueron seleccionados de la repetición ubicada en Campos Azules para la toma de fotografías en el mes de Agosto 2013. Para *T. rosea* por ser especie caducifolia, se procedió en el mes de Noviembre del 2013 a la segunda toma de imágenes.

Apoyándose con el software Gap Light Analyzer (GLA) (Frazer *et al.*, 1999), permite analizar cada una de las fotografías hemisféricas que separa el área específica de la formación de la copa de los árboles. Con las imágenes, el software permite separar el área vegetal y los espacios no ocupados por vegetación que lo interpreta como un área no cubierta por las hojas. El software permite hacer los siguientes cálculos: índice de área foliar, porcentaje de apertura del dosel, porcentaje de transmisión de radiación solar directa, difusa y total.

c) Índice de área foliar alométrico

Según Aguirre *et al.*, (2011), una vez obtenidos los índices de área foliar por los métodos: destructivo y no destructivo; se procede a calibrar ambos métodos utilizando un IAF alométrico para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

$$IAF_{\text{alométrico}} = \frac{(\sum_{i=1}^n (\frac{AFS}{2}))}{A}$$

IAF<sub>alométrico</sub> = índice de área foliar alométrico por parcela; AFS = área foliar superficial individual (m<sup>2</sup>); A = área de la parcela (400 m<sup>2</sup>); i = i-ésimo árbol de la parcela.

Sin embargo, la fórmula anterior solamente es válida para *Pinus patula*, por lo que en este estudio se modificó dicha metodología, considerando la fórmula de correlación entre DN y área foliar se deduce Área Foliar Específica (AFE), por su parte el peso seco de la biomasa del follaje (BF) se calcula con la fórmula de correlación entre DN y biomasa. Por lo cual, se emplean las siguientes fórmulas para estimar IAF alométrico:

$$AFS = (AFE) (BF)$$

AFS = área foliar superficial por árbol (m<sup>2</sup>),      AFE = área foliar específica por árbol  
(m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>),      BF = peso seco de la biomasa del follaje (kg)

Posteriormente se obtuvo el Índice de área foliar alométrico a través de la ecuación:

$$IAF_{\text{alométrico}} = \frac{\sum AFS}{A_{\text{cop}}}$$

AFS = área foliar superficial por árbol (m<sup>2</sup>); A<sub>cop</sub> = área de copa del árbol

### ***Muestreo para determinar radiación no interceptada por los árboles de sombra***

Para medir la cantidad de radiación incidente sobre el follaje de las plantas de Café que no es interceptada por el follaje de los árboles de sombra, se modificó la metodología propuesta por Arcila *et al.*, (2007), en la que cada unidad de medición se divide en cuadrantes y a éstos se le asignan puntos de medición, de acuerdo al tamaño de la unidad. El punto de medición corresponde al sitio donde está ubicado una planta de Café (Figura 3).

Este estudio, se realizó en una primera área de muestreo en cuatro árboles de sombra (2 árboles de *T. rosea* y *S. glauca*) y una segunda área de muestreo con cuatro árboles de sombra (2 árboles de *I. laurina* y *S. saman*) en áreas de CENECOOP durante el período de Mayo 2013 hasta Julio del mismo año, el criterio de selección se basó en la combinación de árboles ubicados diagonalmente y en la uniformidad de distancia entre las especies.

En cada área de muestreo de *T. rosea* + *S. glauca* se contabilizaron 36 plantas de Café, dos árboles de *S. glauca* y dos de *T. rosea*, en cambio en cada área de muestreo de *I. laurina* + *S. saman* se contabilizaron 48 plantas de Café, dos árboles de *I. laurina* y dos de individuos *S. saman* (Figura 3).

Para realizar las mediciones de luminosidad (radiación no interceptada en el SAF) se empleó un Luxómetro digital portátil (modelo 401025), el cual se colocó por encima de la copa de la planta de Café (punto de medición) haciendo una lectura posterior a un periodo de 1 o 2 minutos. Las mediciones fueron obtenidas en lux (lm/m<sup>2</sup>) y se realizaron entre las 11:00-13:00 horas del día, momento en el cual el ángulo de inclinación solar es cercano o igual a los 90°.

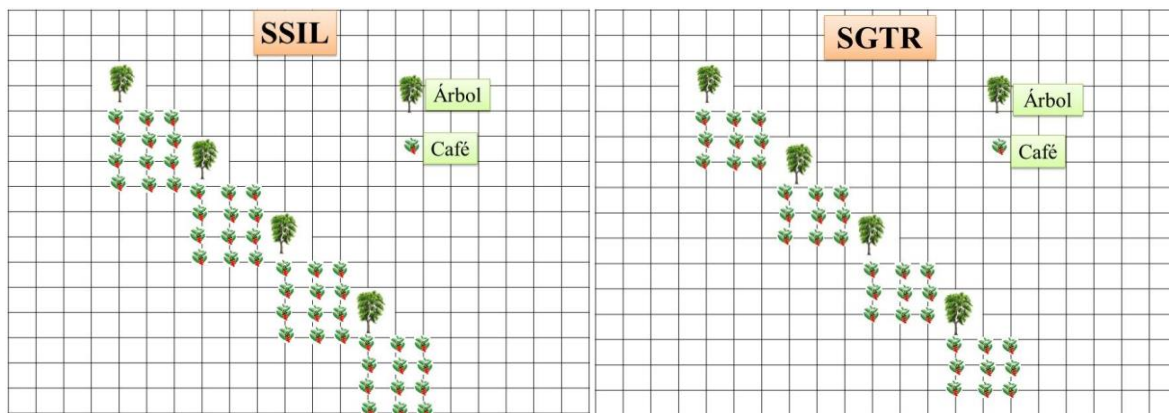


Figura 3. Puntos de medición de entrada de radiación solar sobre las plantas de Café.

### ***Muestreo para determinar concentración de Mg en las hojas de Café***

Fue realizado el análisis del contenido de Magnesio ( $Mg^{++}$ ) en hojas de Café, dado el papel fisiológico bien conocido de este mineral, el cual es un componente básico de la molécula de clorofila, siendo el principal pigmento fotosintético en los vegetales (Suárez, 2012). Este muestreo se realizó en las subparcelas 5, 6, 7, 8 (sombra de *I. laurina* + *S. saman*); subparcelas 9, 10, 11 y 12 (sombra de *T. rosea* + *S. glauca*) pertenecientes a la repetición II (CENECOOP) más dos muestras de las subparcelas 13 y 14 con Café a pleno sol (testigo), resultando un total de 10 unidades de muestreo.

El muestreo fue realizado en zigzag a lo largo de las subparcelas tomando una planta de Café por surco y de cada planta cuatro hojas sanas y maduras en las bandolas en fructificación. El muestreo se efectuó en horas de la mañana del día 15 de Octubre del año 2013. Posteriormente, las muestras de hojas se entregaron al Laboratorio de Suelos y Aguas (LABSA) de la Universidad Nacional Agraria para proceder al análisis químico, siendo aplicado el método por digestión húmeda con mezcla sulfo selénica (método estándar), y el  $Mg^{++}$  fue medido por absorción atómica.

El resumen de la estrategia metodológica seguida en este estudio se presenta en el Anexo 3.



### 3.2.2. Caracterización Etnobotánica de las especies forestales presentes en el Ensayo

#### ***Inga laurina* (Sw) Willd. (Guaba, guabillo, cuanjiniquil)**

##### **Familia: Mimosaceae**

Árbol perennifolio de mediano a grande entre 6 y 18 m de altura, copa amplia, de ramas largas, follaje ralo, siempre verde, la caída de sus hojas en los meses de febrero a marzo. La corteza externa es gris, un poco lisa, hojas alternas paripinnadas y vellosas, con tres a cinco pares de hojuelas de elípticas a oblongas. Debido a la sombra que produce, a su fácil germinación por semilla, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos es usado como árbol de sombra en cultivos perennes, principalmente cafetales, y en diversos sistemas agroforestales (MARENA/INAFOR, 2002).

#### ***Samanea saman* (Jacq.) Muell. (Genízaro, Cenícero, genícero, Carreto)**

##### **Familia: Mimosaceae**

Árbol semicaducifolio alcanza alturas hasta de 30 m, copa densa y extendida. Corteza externa gris negruzca, hojas compuestas, bipinadas, alternas; las hojuelas son obtusas a redondeadas en el ápice y se cierran durante la noche, la caída de hojas ocurre en el mes de diciembre. Se puede usar en general en las construcciones, acabados y divisiones interiores, artículos torneados, gabinetes, molduras, ruedas de carreta, chapas decorativas, postes (tratados) y muebles. Así también, como árbol de sombra en cafetales, de potreros o pastizales y como ornamental en carreteras, las legumbres largas y negras son muy apreciadas para forraje (MARENA/INAFOR, 2002).

***Simarouba glauca* (Aubl.) DC. (Aceituno, Talchocote, Negrito, Acetuna, Aceituna)**

**Familia: Simaroubaceae**

Árbol perennifolio de crecimiento mediano a grande, alcanzando 35 m de altura. Copa en forma de sombrilla, fuste recto, cilíndrico, corteza gris amarillenta, bastante lisa, hojas imparipinadas, alternas que caen en los meses de febrero, marzo, abril. Se usa en construcciones livianas y molduras, contrachapados, cajas, juguetes, artículos deportivos, fósforos, palillos, tacones de zapatos, partes de instrumentos musicales y artesanías. Muy utilizado en sistemas agroforestales, empleándose como cercas vivas, árbol de sombra para cultivos de Café y cortinas rompe viento, es una especie promisoría para la reforestación (MARENA/INAFOR, 2002).

***Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Roble macuelizo, Roble sabanero, Falso roble)**

**Familia: Bignoniaceae**

Árbol caducifolio con altura de 20 m alcanzando hasta 30 m; corteza verticalmente fisurada de color gris oscuro a negruzco; hojas compuestas digitadas, opuestas; hojuelas elípticas a oblongo - elípticas, ellas caen en los meses de marzo, abril, mayo. Muestra un buen comportamiento en plantaciones y ensayos de enriquecimiento. Se utiliza también en sistemas silvopastoriles como árboles dispersos, linderos, como sombra para Café y ornamental. Puede utilizarse en construcciones generales, producción de muebles, acabados y divisiones interiores, mangos de herramientas, implementos agrícolas, artículos deportivos, pisos, cubiertas y otras partes de botes, así como, chapas decorativas (MARENA/INAFOR, 2002).

### 3.3. Análisis de datos

A partir de las mediciones directas recolectadas de biomasa del follaje y área foliar se obtuvieron ecuaciones alométricas para estimar IAF en *Inga laurina* (Sw.) Willd., *Samanea saman* (Jacq.) Merr., *Simarouba glauca* DC y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. La relación entre DN y biomasa así como entre DN y área foliar se aplicaron varios modelos de regresión lineal, exponencial y logarítmica, para seleccionar el de mejor ajuste y el de mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Las ecuaciones fueron de la forma  $Y=mx+b$ ; Y es la biomasa del follaje (kg) o el Área foliar ( $\text{cm}^2$ ), X es el DN (cm).

Los datos de radiación solar no interceptada en el sistema, fueron organizados y aplicados un análisis de varianza considerando las fuentes de variación los tipos de árboles y la combinación de los mismos. A las medias de los tratamientos se les sometió a un análisis de separación de medias de rangos múltiples por Tukey. El procedimiento fue realizado con la ayuda del software Statistic Analysis Systems versión 8 (SAS Institute Inc. 1,999).

Para analizar una fotografía hemisférica con Gap Light Analyzer (GLA) se siguieron cinco pasos: abrir una imagen existente, registrar la imagen para esto se utilizaron 2 medidas de radios; el primer radio fue de 500 y se utilizó en las imágenes de *S. glauca*, *S. saman* e *I. laurina*; por su parte en las imágenes de *T. rosea* se utilizó un radio de 340, luego se selecciona solo la copa del árbol y se clasifica con píxeles como un cielo (blanco) o no cielo (negro); por último, se ejecutan los cálculos de IAF los cuales a su vez fueron promediados.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Estructura vegetal del sistema agroforestal con Café

El componente arbóreo en el SAF con Café ha creado un piso o estrato superior y cubre el cultivo de Café, solo se encontró un estrato porque las especies forestales son coetáneas. Los doseles de los árboles son muy abiertos como ocurre en la combinación SSIL o casi cerrados como los árboles de la combinación SGTR. En cuanto a la estructura ecológica, son codominantes las especies *Inga laurina*, *Simarouba glauca* y *Tabebuia rosea*; en cambio la especie *Samanea saman* presenta árboles suprimidos.

De acuerdo con Moraga *et al.*, (2011), la estructura del SAF depende en gran parte de las especies arbóreas por su diferencia en la morfología, el dosel, su crecimiento y características biológicas como leguminosas o maderables; además conocer la estructura del sistema orienta sobre algunos aspectos para el manejo de este cultivo, como son la elección de la densidad de siembra, disposición de las plantas en el terreno, tamaño y forma del árbol, tipo y momento de las podas entre otros.

El Cuadro 2, muestra la densidad de árboles por hectárea por sistema de sombra y por subparcela que se encuentran en el área de estudio, los resultados indican que existe una alta densidad de árboles por hectárea en los sistemas de sombra, influenciando la competencia entre árboles debido a la posible disminución en la disponibilidad de luz, agua o nutrientes cuando su dosel o el área radical se traslapa entre ellos.

Cuadro 2.- Densidad de árboles por hectárea (ha) por subparcela y sistema de sombra

Combinación de Sombra	Especie	Árboles por hectárea	Total árboles por hectárea
SSIL	SS	88,4	227,4
	IL	139	
SGTR	SG	84,9	194,9
	TR	110	
SSTR	SS	90,9	207,8
	TR	116,9	
SGIL	SG	145,8	<b>236,1</b>
	IL	90,3	

Se observó que la combinación SSIL presentó una alteración en el tamaño de la estructura de la población es decir, la alta densidad de *I. laurina* aventajó a *S. saman* en el crecimiento. Por lo tanto se deben aplicar raleos para alcanzar los valores deseables en un SAF con Café los cuales varían de 70 a 120 árboles por ha (Arcila *et al.*, 2007).

Los resultados muestran que en años anteriores, al aplicar raleos selectivos donde el criterio fue disminuir la población de árboles dentro del Ensayo, produjo un problema de manejo en el sistema causando distanciamientos heterogéneos, por lo cual, no hay igual cantidad de árboles por especie en las réplicas, esto a su vez influye en el comportamiento de las especies en cuanto a competencia, densidad, desarrollo en diámetro y altura. No obstante, cabe enfatizar que esta cantidad de árboles además de servir como sombrero en cafetal permite obtener otros productos como leña, madera o frutas, es decir, diversifica los productos necesarios para el autoabastecimiento.

El crecimiento de un árbol es considerado como el aumento de tamaño en el tiempo expresándose en términos del DN, altura, área basal o volumen y es producto de los procesos de anabolismo (síntesis) y catabolismo. Dicho crecimiento está determinado por factores internos y externos. Los internos son principalmente genéticos y fisiológicos; los externos son fundamentalmente climáticos, edáficos y de competencia con los demás árboles o cultivos asociados (Louman *et al.*, 2001).

En el contexto global actual, los cambios en el clima, en el contenido hídrico de los suelos, la posible extinción o invasión de especies y la introducción de otras, principalmente microbianas, son factores del medio cambiante a los cuales las diversas especies de plantas deberán acoplarse para crecer y reproducirse de forma exitosa. En este estudio se obtuvieron datos de DN y altura total como parámetros que indican crecimiento a lo largo de los años de las especies presentes en el sistema agroforestal.

En la investigación de Velásquez y González (2012) realizada en este mismo sitio encontraron que *Simarouba glauca* a la edad de 9 años tenía un DN de 19,75 cm y una altura de 11,77 m; *Tabebuia rosea* tenía un DN de 19,75 cm y una altura de 9,76 m; *Inga laurina* a los 8 años tenía un DN de 24,23 cm y una altura de 9,70 m. Por su parte *Samanea saman* a la edad de 6 años tenía un DN de 10,7 cm y una altura de 5,65 m.

Adicionalmente, encontraron que *Tabebuia rosea* incrementa en DN 2,15 cm por año, en altura 1,09; *Simarouba glauca* incrementa en DN 2,14 cm cada año, en altura 1,13 m anualmente; por su parte *Inga laurina* incrementa en DN 3,01 cm cada año y en altura incrementa 1,34 m anualmente.

En la actualidad han cambiado los valores debido al crecimiento de los individuos (Cuadro 3), los cuales muestran un buen desarrollo de estas especies en cuanto a sus características morfológicas. Se ha postulado que en SAF la fertilidad del suelo parece incrementarse de manera proporcional a la altura de los árboles en asocio.

Cuadro 3. Diámetro normal (DN) y altura total de árboles por especie y su incremento medio anual (IMA), área basal ( $m^2$ ) y volumen de madera ( $m^3 ha^{-1}$ )

<b>Especie</b>	<b>DN</b>	<b>IMA del DN</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>IMA de la Altura (m)</b>	<b>Área basal (<math>m^2 ha^{-1}</math>)</b>	<b>Volumen de madera comercial (<math>m^3 ha^{-1}</math>)</b>
SG	24,77	1,98	12,55	1,00	30,727	270,095
TR	26,71	2,09	15,14	1,18	31,399	331,261
SS	18,86	1,71	9,00	0,82	15,312	106,839
IL	29,72	2,37	11,13	1,01	62,890	423,672

Por su parte *Samanea saman* a los 11 años tiene un DN de 18,86 cm y una altura de 9,00 m; ésta especie en particular no muestra un buen crecimiento posiblemente porque la mayoría de individuos se encuentran suprimidos y no reciben la cantidad necesaria de radiación solar, por lo que, no corresponden los valores con la tasa anual de crecimiento de esta especie la cual supera los 2-3 m de altura y 3 cm en DN (Cárcamo y Murillo, 2009); en contraste Velásquez y González (2012) encontraron en la misma área de estudio que esta especie incrementa en DN 1,83 cm al año y en altura incrementa 1,04 m.

El total de área basal estimada por hectárea fue de 140,33  $m^2$  y en relación al volumen total por hectárea se estimaron 1131,87  $m^3$  (Cuadro 3). El volumen es la forma de expresión de la cantidad de madera contenida en el sistema, además se usa para estimar biomasa y almacenamiento de carbono, cabe mencionar que el volumen y el área basal se pueden utilizar en la construcción de ecuaciones alométricas.

## 4.2. Determinación del índice de área foliar (IAF) de los árboles mediante el método destructivo

### 4.2.1. Calibración de área foliar utilizando Planímetro LI 3100

Para asegurar la fiabilidad de la información medida del área foliar a partir del uso de un medidor digital LI-3000, se aprovechó la disponibilidad de otro modelo superior LI-3100, el cual es un instrumento más preciso por minimizar el error de medición. Los resultados obtenidos para ambos casos fueron los siguientes:

Cuadro 4. Ecuaciones de calibración de área foliar (cm<sup>2</sup>) por hoja y especie

Especie	LI-3000	LI-3100	Diferencia	Ecuación	R <sup>2</sup>
<i>I. laurina</i>	473,3	236,6	236,7	$y = 0,4922x$	0,7188
<i>S. saman</i>	700,8	467,6	233,2	$y = 0,6611x$	0,9469
<i>S. glauca</i>	173,2	109,6	63,6	$y = 0,6392x$	0,9351
<i>T. rosea</i>	474,8	294	180,8	$y = 0,6313x$	0,871

Los datos de área foliar de *T. rosea*, *I. laurina* y *S. saman* son producto de que al pasar las hojas por el LI-3000 se midieron por folíolos ya que la hoja completa no pudo ser medida debido a las formas de las hojas y al diseño del instrumento lo que aumentó el error de medición, por el contrario con las hojas de *S. glauca* se alcanzó tomarlas en una sola medición, sin embargo los valores del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) son aceptables por lo que estadísticamente se puede decir que el modelo de regresión utilizado es correcto y adecuado.

Para obtener una ecuación general se correlacionaron todas las mediciones de área foliar tomadas con ambos instrumentos de las cuatro especies forestales en estudio (Figura 4).

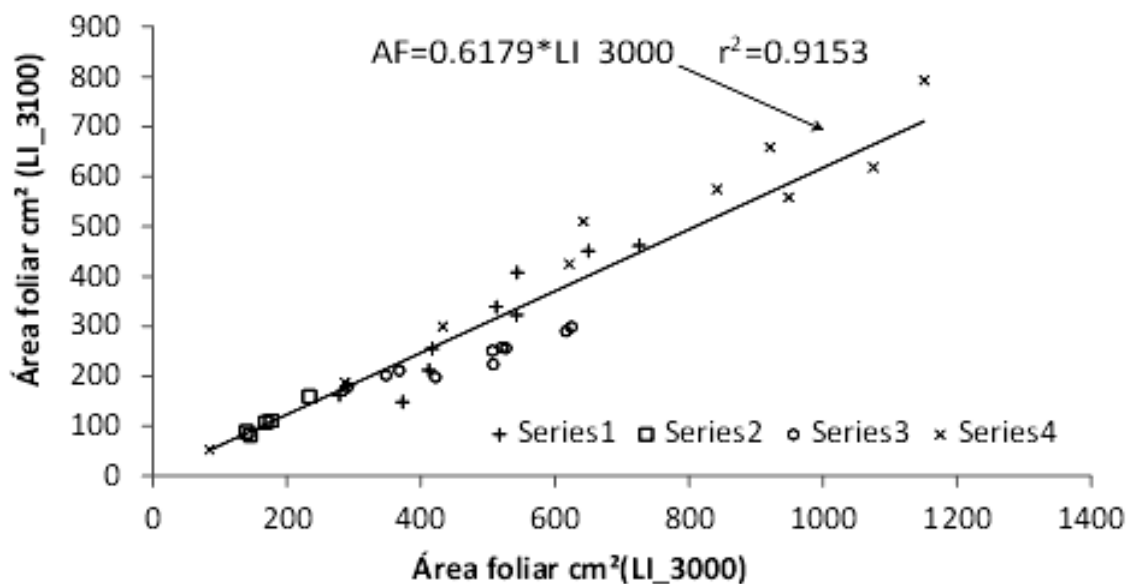


Figura 4. Ecuación de calibración de área foliar (AF) para todas las especies.

#### 4.2.2. Índice de área foliar (IAF) de los árboles

El índice de área foliar (IAF) es la proporción de hojas que cubren las proyecciones de ellas en el suelo y es un indicador útil de la capacidad fotosintética de las plantas (López *et al.*, 2009). El Cuadro 5, se presentan los datos de IAF de *T. rosea* que por las razones anteriormente expuestas no se incluyeron con las demás especies. En el Cuadro 6, se observan los valores de IAF de los 12 individuos talados.

En los Cuadros 5 y 6, índice de área foliar 1 (IAF 1), se refiere al resultado de aplicar la ecuación de calibración por especie en relación al peso seco obtenido del laboratorio; IAF 2 fue calculado a partir de la ecuación de calibración por especie y de aplicar un coeficiente de secado (Anexo 7); en cambio IAF 3 es el resultado de aplicar la ecuación de calibración general (Figura 4) y el peso seco obtenido del laboratorio.

La ecuación general de calibración indica que en las futuras determinaciones de Índice de Área Foliar (IAF) para las cuatro especies forestales en estudio, los datos obtenidos del Planímetro LI-3000 deberán ser multiplicados por el valor 0,6179.



En general los procedimientos destructivos, permiten obtener gran exactitud en las estimaciones, pero son lentos, costosos y resultan imprescindibles para validar los procedimientos no destructivos (López *et al.*, 2009; Muñoz *et al.*, 2008; Jonckheere *et al.*, 2004). Sin embargo los métodos no destructivos son generalmente más rápido, susceptibles de automatización y de ese modo permiten un mayor número de muestras espaciales a ser obtenidas y por razones de conveniencia en cuanto a que estos métodos son amigables con el ambiente se están volviendo más y más importantes.

Cuadro 5. Valores de índices de área foliar (IAF) de *T. rosea* obtenidos por el método destructivo

<b>Especie</b>	<b>Lugar</b>	<b>Mes</b>	<b>IAF 1</b>	<b>IAF 2</b>	<b>IAF 3</b>
<i>Tabebuia</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	0,56	0,85	0,33
<i>Tabebuia</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	2,48	2,27	2,43
<i>Tabebuia</i> 3	CENECOOP	Noviembre 2013	2,77	2,27	2,72
<i>Tabebuia</i> 4	CENECOOP	Noviembre 2013	3,65	3,83	3,59
<b>Promedio</b>			<b>2,37</b>	<b>2,31</b>	<b>2,27</b>

Cuadro 6. Valores de índices de área foliar (IAF) de *Inga laurina*, *Samanea saman* y *Simarouba glauca* obtenidos por el método destructivo

<b>Especie</b>	<b>Lugar</b>	<b>Mes</b>	<b>IAF 1</b>	<b>IAF 2</b>	<b>IAF 3</b>
<i>Inga</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	2,14	2,28	3,02
<i>Inga</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	2,41	2,4	2,61
<i>Inga</i> 3	CECA	Agosto 2013	4,17	4,3	3,82
<i>Inga</i> 4	CECA	Agosto 2013	2,93	3,26	3,78
<b>Promedio</b>			<b>2,91</b>	<b>3,06</b>	<b>3,31</b>
<i>Samanea</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	2,13	2,28	2,13
<i>Samanea</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	3,72	3,46	3,27
<i>Samanea</i> 3	CECA	Agosto 2013	4,16	4,21	1,40
<i>Samanea</i> 4	CECA	Agosto 2013	2,91	3,18	2,87
<b>Promedio</b>			<b>3,23</b>	<b>3,28</b>	<b>2,42</b>
<i>Simarouba</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	1,23	1,32	1,19
<i>Simarouba</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	1,54	1,57	1,53
<i>Simarouba</i> 3	CECA	Agosto 2013	2,35	2,35	2,69
<i>Simarouba</i> 4	CECA	Agosto 2013	1,48	1,54	1,47
<b>Promedio</b>			<b>1,65</b>	<b>1,70</b>	<b>1,72</b>

### **4.3. Determinación del IAF de los árboles mediante Fotografías hemisféricas (Método no destructivo)**

El índice de área foliar (IAF) es un importante parámetro, indicador de diversos aspectos funcionales en comunidades vegetales puesto que es considerado una variable clave en modelos ecológicos que analizan el crecimiento y productividad de las plantas (Urrego y Pérez, 2013). Medir éste, utilizando métodos destructivos es tedioso y difícil, por lo que resulta valioso encontrar técnicas no destructivas que a la vez proporcionen resultados precisos y confiables.

Ha sido postulado que la fotografía hemisférica es una técnica aprobada para estimar la estructura del dosel de copas, IAF y la transmisión de la radiación solar bajo el dosel en bosques templados, tropicales y boreales (Promis, 2013; Martínez *et al.*, 2005). En el Cuadro 7, se muestran los resultados de aplicar las fotografías hemisféricas como método de estimación de IAF, los datos de *T. rosea* no se incluyen en el Cuadro 7, porque las mediciones se hicieron en tiempos diferentes a las demás especies, dos árboles en julio 2013 y dos árboles en noviembre 2013; en ambos períodos las mediciones se hicieron en CENECOOP.

Debido a que esta especie es caducifolia, en julio cuando empezaba a producir hojas *T. rosea* 1 obtuvo un IAF de 0,36 y *T. rosea* 2 0,66 de IAF, en cambio cuando ya estaba el total de sus hojas (noviembre) *T. rosea* 3 obtuvo un IAF de 0,70 y *T. rosea* 4 0,81 de IAF, dichos resultados en este aspecto representan un ejemplo de las variaciones que podrían encontrarse en la determinación de IAF para la misma especie pero en diferentes épocas del año (Nathalie y Bréda, 2003). Se debe resaltar que en la literatura no se encontraron datos disponibles de IAF para especies tropicales, predominando información para especies templadas, principalmente.

Cuadro 7. Valores de índices de área foliar (IAF) de *Inga laurina*, *Samanea saman* y *Simarouba glauca* obtenidos por el método no destructivo (Fotografías hemisféricas)

<b>Especie</b>	<b>Lugar</b>	<b>Mes</b>	<b>IAF</b>
<i>Inga</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	1,61
<i>Inga</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	1,53
<i>Inga</i> 3	CECA	Agosto 2013	1,84
<i>Inga</i> 4	CECA	Agosto 2013	1,59
<b>Promedio</b>			<b>1,64</b>
<i>Samanea</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	0,56
<i>Samanea</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	0,85
<i>Samanea</i> 3	CECA	Agosto 2013	1,03
<i>Samanea</i> 4	CECA	Agosto 2013	0,70
<b>Promedio</b>			<b>0.63</b>
<i>Simarouba</i> 1	CENECOOP	Julio 2013	0,20
<i>Simarouba</i> 2	CENECOOP	Julio 2013	0,29
<i>Simarouba</i> 3	CECA	Agosto 2013	0,63
<i>Simarouba</i> 4	CECA	Agosto 2013	0,29
<b>Promedio</b>			<b>0,35</b>

Aunque la literatura reporta que la fotografía hemisférica es un método eficiente en términos logísticos para la obtención rápida de IAF, no obstante, tiene la desventaja de subestimar los valores en comparación con mediciones destructivas (Papamija y García, 2012; Roblero *et al.*, 2012; Jonckheere *et al.*, 2004; Silvano, 2004; Mussche *et al.*, 2001).

### ***Predicción del IAF a partir de ecuación alométrica***

Según Picard *et al.*, 2012, la alometría se refiere al desarrollo ontogénico de los individuos, es decir, al crecimiento de los árboles. Las ecuaciones alométricas son las herramientas más utilizadas para predecir biomasa, área foliar e índice de área foliar de un árbol a partir de características dendrométricas más fáciles de medir, como el diámetro o la altura. El IAF es un parámetro dinámico cuya estimación es de gran utilidad en estudios relacionados con el análisis de efectos del cambio climático.

El presente cálculo predictivo del IAF alométrico es a partir de datos provenientes del DN, diámetro de copa, peso seco y área foliar del árbol (método destructivo). En el Cuadro 8 se muestran las ecuaciones alométricas empleadas en la estimación de IAF alométrico y que fueron obtenidas relacionando DN y peso seco para obtener el estimador biomasa, asimismo la relación entre DN y área foliar deduce el estimador área foliar; además se presenta el coeficiente de determinación el cual mide la calidad del ajuste y cuanto más próximo de uno es, mejor es la calidad del ajuste.

Cuadro 8. Ecuaciones alométricas usadas para estimar el índice de área foliar (IAF)

<b>Especie</b>	<b>Ecuación alométrica</b>	<b>Estimador</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<i>Inga laurina</i>	$y = 1969,6x - 9987,3$	Biomasa	0,9469
<i>Samanea saman</i>	$y = 1470,7x - 16082$		0,9295
<i>Tabebuia rosea</i>	$y = 2282,7x - 39478$		0,8889
<i>Simarouba glauca</i>	$y = -105,27x + 20759$		0,9489
<b>y: Peso seco;      x: DN</b>			
<i>Inga laurina</i>	$y = 25,24x - 274,01$	Área foliar	0,9964
<i>Samanea saman</i>	$y = 18,048x - 259,38$		0,8275
<i>Tabebuia rosea</i>	$y = 21,873x - 422,52$		0,7016
<i>Simarouba glauca</i>	$y = -4,281x + 179,86$		0,9611
<b>y: Área foliar;      x: DN</b>			

Una vez aplicadas las ecuaciones y las fórmulas modificadas de Aguirre *et al.*, 2011 se obtuvieron los valores de predicción del IAF alométricos para cada individuo en estudio (Cuadro 9), y en el Cuadro 10 se presentan los datos de *Tabebuia rosea*; posiblemente las diferencias en estos valores son producto de la influencia en el crecimiento que tienen los factores del ambiente o época en que se tomaron las mediciones, así como del número de observaciones utilizadas para generar IAF alométrico.

Cuatro datos por especie resultan muy pocos para generar un modelo alométrico (Henry *et al.*, 2011; Zianis *et al.*, 2005; Chave *et al.*, 2004), por lo que pueden pasar 2 situaciones: las correlaciones resultan muy bajas o muy altas y es posible que esto explique en parte los altos valores mostrados en los Cuadros 9 y 10. Sin embargo, son los primeros que se estarán reportando en la literatura para estas especies forestales.

Cuadro 9. Valores de IAF para las especies tropicales *Inga laurina*, *Samanea saman* y *Simarouba glauca* obtenidos al aplicar las ecuaciones alométricas

Árbol	<i>I. laurina</i>	<i>S. saman</i>	<i>S. glauca</i>
1	195,72	13,00	37,44
2	75,28	117,00	18,18
3	392,65	71,30	36,55
4	100,10	42,90	40,44
<b>Promedio</b>	<b>190,94</b>	<b>61,05</b>	<b>33,15</b>

Cuadro 10. Valores de IAF alométrico para *T. rosea*

Especie	IAF Alométrico
<i>Tabebuia rosea</i> 1	6,12
<i>Tabebuia rosea</i> 2	10,66
<i>Tabebuia rosea</i> 3	61,10
<i>Tabebuia rosea</i> 4	52,41

#### **4.4. Radiación solar incidente sobre el follaje de las plantas de Café (luminosidad no interceptada en el SAF)**

De acuerdo con Smith y Smith (2007), la cantidad de luminosidad que penetra en la copa de los árboles y llega al suelo varía tanto en cantidad como en la posición de las hojas. Las variaciones temporales en la intensidad de la radiación solar tienen consecuencias ecológicas sobre las plantas afectando su fotosíntesis, morfología, tolerancia a la sombra, crecimiento y supervivencia (Promis, 2013).

La combinación SSIL presentó una radiación no interceptada promedio de 29911,11 lux; en cambio la combinación SGTR 26817,30 lux (Figura 5). Los resultados indican que la combinación *S. saman* + *I. laurina* permite una mayor entrada de radiación solar, al presentar ambas especies un dosel bajo y abierto; sin embargo *S. glauca* y *T. rosea* presentan un dosel alto y estrecho por lo que se reduce el paso de radiación al cafetal.

Los datos de radiación solar no interceptada por los árboles de sombra pueden estar influenciados por la morfología de cada especie, ya que muchas especies adaptadas a climas cálidos tienen hojas pequeñas y delgadas que minimizan el efecto de temperaturas altas y el peligro de sobrecalentamiento.

Además los resultados están influenciados por la densidad de árboles por hectárea que hay en el área de estudio, al aumentar la densidad dentro de los cafetales aumenta el porcentaje de ocupación del dosel lo cual conlleva a que las copas de los árboles ocupen mayor dosel y eviten el paso de luz a los cafetales. Según Bellow y Nair (2003), la densidad y la altura están correlacionadas negativamente debido a que bajo árboles pequeños la influencia horizontal de los vecinos es menor comparada con árboles más altos, donde la acumulación de los efectos de varias copas puede afectar la transmisión de la luz inclusive cuando el sol se encuentra en su punto más alto en el cielo.

De acuerdo a Lambers *et al.*, (2008), plantas adaptadas a zonas sombrías frecuentemente tienen hojas largas y delgadas que maximizan la interceptación de radiación solar. Los folíolos de las hojas de *S. saman* son ligeramente sensibles a la luz y se cierran por las noches o en días sombreados, es una especie intolerante a la sombra por lo que se limita el proceso de la fotosíntesis.

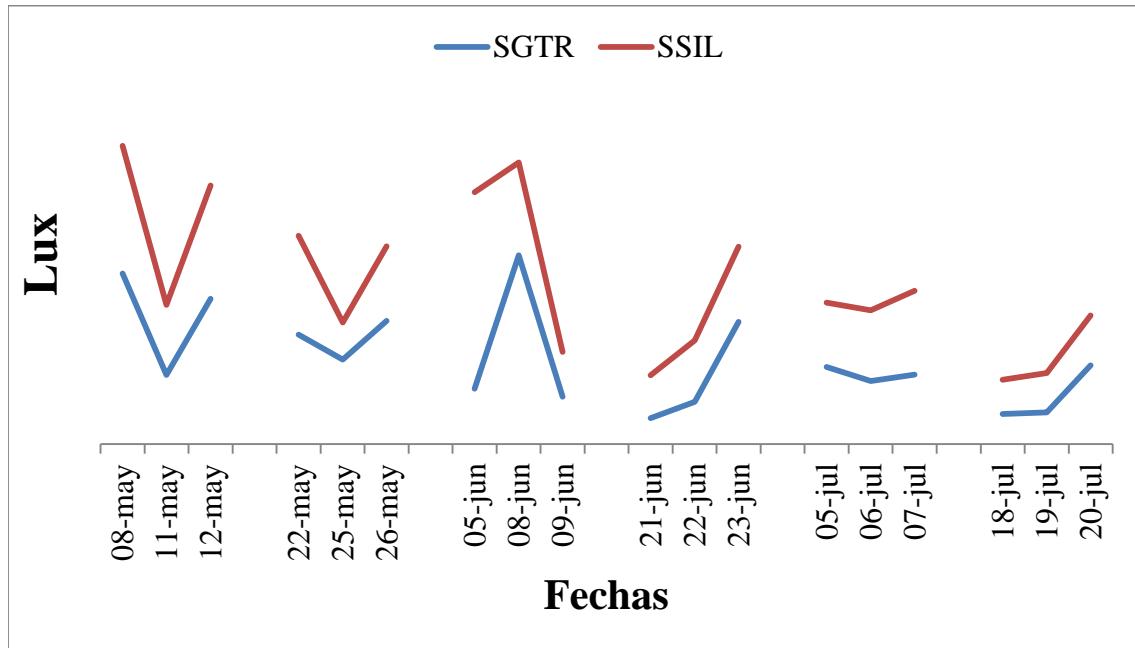


Figura 5. Radiación incidente sobre el follaje de las plantas de café en SAF con café.  
Réplica II CENECOOP, 2013.

Las plagas o enfermedades son factores biológicos que pueden afectar la fotosíntesis a través de la defoliación severa, tal como puede ocurrir con el ataque en *S. saman* de la oruga o larva de *Melipotis indomita*. Por su parte las hojas *I. laurina* es una especie demandante de luz, invasora y con copa extendida, pero follaje esparcido pueden ser atacadas por *Tetrolopha scabridella* causando severa defoliación. Mientras que las especies de *S. glauca* y *T. rosea* son tolerantes a la sombra y con copas estrechas e irregulares (Boshier y Cordero, 2003).

Cabe mencionar que en los meses mayo, junio y julio de toma de datos tanto *S. saman* como *I. laurina* estaban siendo atacados por “antracnosis” (*Colletotrichum coffeanum* Noack), una enfermedad también conocida como “quema” o “chasparría”, los síntomas de las hojas infectadas se vuelven amarillas, se marchitan y desprenden, o bien mueren con gran rapidez y se secan antes de que puedan desprenderse (Figuras 6 y 7), por lo tanto en este caso la caída de hojas de estas especies forestales produjo un mayor paso de radiación al cafetal.



Figura 6. Hojas de *S. saman* afectadas por antracnosis

Figura 7. Hojas de *I. Laurina* afectadas por antracnosis

Por otro lado las mediciones con Luxómetro han sido objetadas como un método para ser usado en el entendimiento de la ecología de plantas, debido a las diferencias entre las sensibilidades espectrales del ojo humano y los mecanismos de fotosíntesis. A su vez, no pueden ser convertidas en medidas relevantes para comprender procesos en las plantas sin el conocimiento de la composición espectral de la luz. A pesar de estos inconvenientes, y debido a la facilidad de la medición en campo, las mediciones con Luxómetro son comúnmente utilizadas para caracterizar ambientes lumínicos bajo el dosel arbóreo y para tratar de explicar algunos patrones de las plantas (Promis, 2013).

#### 4.5. Contenido de magnesio en hojas de Café

Una deficiencia de Magnesio ( $Mg^{++}$ ) puede ser un factor importante que limita la producción en el cultivo de Café, porque afecta el llenado de granos y frutos (Suárez, 2012). Por lo cual se considera punto clave en la fertilización adecuada para mantener el ciclo de nutrientes (Moraga *et al.*, 2011).

Según Sequi y Piaggese (2004), las cantidades de  $Mg^{++}$  que la planta puede absorber dependen de su concentración en la solución del suelo; dentro de los factores que afectan la disponibilidad y absorción están: bajos pH del suelo, bajas temperaturas, suelos con condiciones secas, y altos niveles de elementos competitivos, tales como el manganeso, potasio y el calcio, los cuales reducen la disponibilidad de este elemento. Las condiciones ambientales y de manejo del sistema en estudio ameritan realizar un escrutinio preliminar de la concentración de  $Mg^{++}$  en hojas de Café de la réplica II CENECOOP (Cuadro 11).



Cuadro 11. Concentración de Magnesio en hojas de Café y su relación con pH del suelo

Nivel de insumo	SGTR		SSIL		Pleno sol	
	% Mg	pH suelo	% Mg	pH suelo	% Mg	pH suelo
CI	1,52	6,0	1,43	5,7	1,47	5,7
OI	1,22	6,2	0,85	6,2	-	-
CM	1,48	6,1	1,55	5,7	1,4	5,7
OM	2	6,2	1,52	6,2	-	-

En la literatura consultada no se encontraron datos de concentración de  $Mg^{++}$  en hojas de Café en bandolas en fructificación, solo se encontraron las concentraciones de este elemento en hojarasca de Café con valores que oscilan entre 0,2-0,4% (Arcila *et al.*, 2007); sin embargo, en este estudio, las concentraciones estuvieron en el rango de 0,85-2% estas diferencias se deben a que este elemento en la planta es móvil y posiblemente antes de caer la hoja, el  $Mg^{++}$  se trasladó a hojas jóvenes de la planta de Café.

Por otro lado, conocer la relación de concentración de  $Mg^{++}$  y el pH del suelo no fue objetivo del estudio, no obstante, resulta de interés señalar algunos aspectos generales sobre el efecto del pH en la disponibilidad de  $Mg^{++}$ . En suelos de bajo pH, la solubilidad de este elemento disminuye y se hace menos disponible (CANACACAO, Sf). Según los resultados del Cuadro 11, el manejo convencional parece tender a disminuir pH del suelo por consiguiente acidifica éste. Adicionalmente, Campillo y Sadzawka (2009) reportan que las especies leguminosas (por ejemplo, la combinación SSIL) mediante el mecanismo de fijación de nitrógeno, liberan hidrógeno a la solución del suelo, contribuyendo a su acidificación gradual.

En el manejo orgánico es posible que la adición del compost esté influenciando la disponibilidad de  $Mg^{++}$  a través de la actividad microbiana o factores abióticos los cuales descomponen las moléculas y liberan nutrientes minerales, los productos de esta actividad pueden incrementar o no e incluso alcalinizar ligeramente el pH y la absorción de  $Mg^{++}$  será afectada ya que a pH menos ácido la solubilidad del  $Mg^{++}$  aumenta. La actividad de mineralización de la flora microbiana y fúngica del suelo es un aspecto importante para la circulación del  $Mg^{++}$  y depende de las condiciones ambientales de la zona.

Otro aspecto interesante de señalar es que el sistema radicular de *S. glauca* y *T. rosea*, puede penetrar más de 1 m permitiendo la colonización del suelo, la complementariedad que se establece entre *S. glauca* y *T. rosea* permiten postular que en estas condiciones las raíces de las plantas de Café logran una mayor penetración y una mayor superficie de contacto con las partículas del suelo, lo cual facilita un incremento en la absorción pasiva de magnesio (Bengough *et al.*, 2011). Además, en esta combinación los árboles presentaron la mayor altura, todo lo cual podría contribuir a explicar porque en ella se encontró mayor porcentaje de magnesio (2%).

Lo anterior contrasta con los resultados de IAF y de radiación no interceptada puesto que es la combinación *S. saman* + *I. laurina* en la que en general se encontraron mayores IAF y en la que la radiación incidente alcanzó mayores valores. Por tanto, vale la pena enfatizar que en el cafetal a pleno sol, la concentración de magnesio no cambia a pesar del manejo, por lo que de alguna manera contribuye a la hipótesis acerca de la influencia de los árboles en la disponibilidad de  $Mg^{++}$  para el cafetal. Arcila *et al.*, (2007) explicaron cómo en las condiciones hídricas y edafológicas del sitio de estudio los árboles pueden contribuir a mejorar el microclima y asimismo a optimizar la circulación del agua y nutrientes.

## V. CONCLUSIONES

En el sistema productivo asociado con Café (*Coffea arabica* L.) evaluado en este estudio, existe alta densidad de árboles por hectárea superior a la recomendada para los sistemas agroforestales.

La información sobre el índice de área foliar de *Simarouba glauca* DC, *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *Inga laurina* (Sw) Willd. y *Samanea saman* (Jacq.) Merr. es preliminar en Nicaragua, por lo cual se convierte en información importante con el fin de tomar decisiones acertadas sobre el manejo de las especies y constituye una línea base para la investigación de su comportamiento ecofisiológico.

El índice de área foliar se puede estimar por métodos destructivos y no destructivos aunque para contrastar ambos resultados es necesario aplicar un factor de corrección o calibración al método no destructivo; seleccionar el método o técnica más apropiada dependerá de los objetivos de la investigación y de la disponibilidad de recursos.

En el SAF con la combinación *Inga laurina* + *Samanea saman* se detectó un mayor paso de radiación solar al cafetal (29911,11 lux) posiblemente debido a las características morfológicas del dosel.

La concentración de magnesio más alta es de 2%, la cual se encontró en las hojas del cafetal del sistema con la combinación *Tabebuia rosea* + *Simarouba glauca* en nivel de insumo orgánico moderado.

## **VI. RECOMENDACIONES**

En el área de estudio se debe aplicar raleo gradual de las especies del componente arbóreo con el fin de garantizar la densidad adecuada (70 a 120 árboles por ha) en el SAF con Café.

La validación de los datos de índice de área foliar en especies forestales implica el desarrollo de futuras investigaciones que contemplen la recolección de mayor cantidad de muestras, en diferentes épocas del año y en otras regiones con condiciones agroecológicas similares.

Profundizar estudios de fertilización con magnesio que permitan determinar las concentraciones de este nutriente óptimas para el cultivo de Café.

Ampliar con fines agroecológicos las investigaciones de radiación solar no interceptada utilizando más de un tipo de instrumento de medición.

## VII. LITERATURA CITADA

- Aguirre Salado, C; Valdez Lazalde, J; Ángeles Pérez, G; de los Santos Posadas, H; Aguirre Salado, A. 2011.** Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos spot 5 hrg: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Arcila, J; Farfán, F; Moreno, A; Salazar, L; Hincapié, E. 2007.** Sistemas de producción de Café en Colombia. Chinchiná, CO. 309 p.
- Arreaga, W. 2002.** Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de la Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 111 p.
- Bellow, JG; Nair, PR. 2003.** Comparing methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems. *Agriculture and Forest Methodology* 114:197-211
- Bengough, AG; McKenzie1, MP; Hallett, D; Valentine, TA. 2011.** Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Dundee, UK. 10 p.
- Blanco, M; Hagggar, J; Moraga, P; Madriz, JC; Pavón, G. 2003.** Morfología del Café (*Coffea arabica* L.), en lotes comerciales, Nicaragua. *Agromía Mesoamericana* 14(1):97-103.
- Boshier, D; Cordero, J. 2003.** Árboles de Centro América. Turrialba, CR, CATIE. 219-922 p.
- Campillo, R; Sadzawka, A. 2009.** La acidificación de los suelos: Origen y mecanismos involucrados. Santiago, CL. 17 p.
- CANACACAO (Cámara Nacional de Cacao, CR).Sf.** El Magnesio en suelo y plantas (en línea). San José, CR. Consultado 13 feb. 2014. Disponible en: <http://www.canacacao.org/contenido.item.379/el-magnesio-en-en-suelo-y-plantas.html>
- Cárcamo, R; Murillo, O. 2009.** Evaluación de un ensayo de procedencia/progenie de *Samanea saman* (Jacq.) Merrill (Genízaro) en Chinandega, NI. 17 p.
- Castillo Rodríguez, E; Arcila Pulgarín, J; Jaramillo Robledo, A; Sanabria, J. 1997.** Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. *CeniCafé* 48(3):182-194.
- Chavarría, R. Hernández, J. 2007.** Biomasa y nutrientes de árboles de sombra en sistemas agroforestales con *Coffea arábica* L de 5 años, en el pacífico de Nicaragua. Tesis. Ing. for. Managua, NI. UNA. 58 p.
- Chave, J; Condit, R; Aguilar, S; Hernandez, A; Lao, S; Perez, R. 2004.** Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Biological Sciences* 359(1443): 409–420.

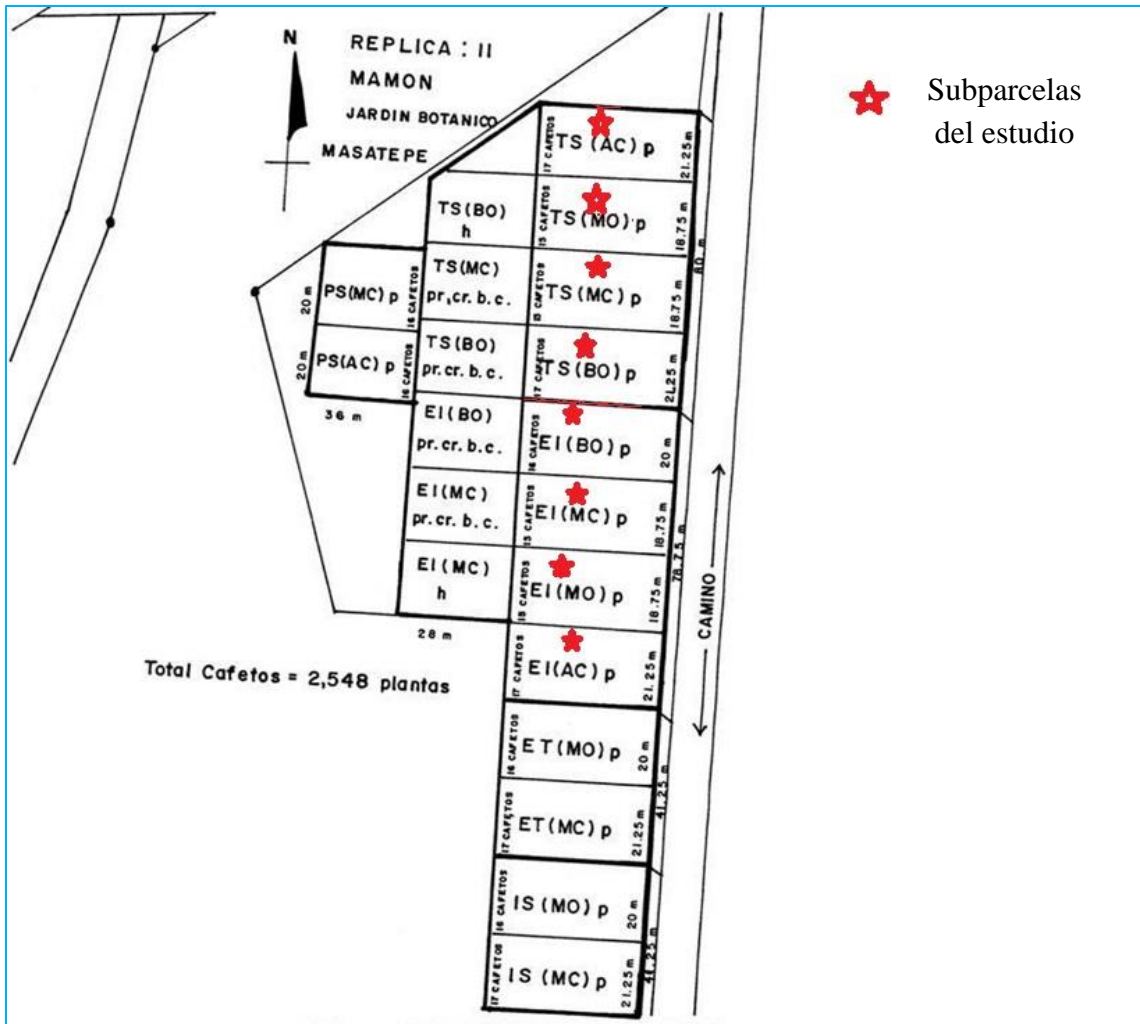
- Frazer, GW; Canham, CD; Lertzman, KP. 1999.** Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, CA. 40 p.
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., Valentini, R., Bernoux, M. & Saint-André, L. 2011.** Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45(3B): 477–569.
- INIFOM (Instituto Nicaragüense de Fomento Municipal, NI). 2000.** Segunda edición de las Caracterizaciones Municipales. 1 disco compacto, 8 mm.
- Imañe, E. 2008.** Epidimetría Forestal. Universidad de de Brasilia/ Departamento de Ingeniería Forestal Mérida/ Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Brasilia. 66 p. (en línea). Consultado 29 abr. 2013. Disponible en [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/9740/1/LIVRO\\_EpidometriaForestal.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/9740/1/LIVRO_EpidometriaForestal.pdf)
- Jonckheere, I; Fleck, S; Nackaerts, K; Muys, B; Coppin, P; Weiss, M; Baret, F. 2004.** Methods for leaf area index determination. Part I: Theories, techniques and instruments. *Agric. For. Meteorol.* 121:19-35.
- Lambers, H; Chapin, S; Pons, T. 2008.** Plant physiological ecology. New York, US. 592 p.
- López Serrano, FR; Morote, FA; Barrero, JJ; Landete, T; Andres, M. 2009.** Estimación directa del índice de área foliar (LAI) en árboles individuales de *Pinus halepensis* Mill. 6 p.
- Louman, B; Valerio, J; Jiménez, W. 2001.** Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba, CR. 265 p.
- MARENA (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, NI)/INAFOR (Instituto Nacional Forestal, NI). 2002.** Guía de especies forestales de Nicaragua. Managua, NI. 304 p.
- Martínez, B; Camacho de Coca, F; García Haro, FJ. 2005.** Estimación de parámetros biofísicos de vegetación, utilizando el método de la cámara hemisférica. *Teledetección* no.23:13-26.
- Moraga, P; Bolaños, R; Pilz, M; Munguía, R; Jürgen, H; Barrios, M; Haggar, J; Gamboa, W. 2011.** Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de Café (*Coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera* 11(17):41-47.
- Muñoz, F; Espinoza, M; Cancino, J; Rubilar, R; Herrera, M. 2008.** Efecto de poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens* Sm. *Bosque* 29(1):44-51.
- Mussche, R; Samson, L; Natchtergale, D; Schrijver, R; Lust, N. 2001.** A comparison of optical and direct methods for monitoring the seasonal dynamics of leaf area index in deciduous forests. *Silva Fenn.* 35:373-384.
- Nathalie, J; Bréda, J. 2003.** Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54 (392): 2403-2417

- Papamija Muñoz, D; García Solórzano, C. 2012.** Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W.Hill. Colombia Forestal 15(2):261-271.
- Picard, N; Saint André, L; Henry, M. 2012.** Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Roma, IT. 223 p.
- Promis, A. 2013.** Medición y estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque. Chapingo 19 (1):139-146.
- Roblero Soto, A; González Tagle, M; Cuellar Rodríguez, L; Jiménez Pérez, J. 2012.** Caracterización del microambiente lumínico en áreas bajo diferentes sistemas de manejo, utilizando fotografías hemisféricas. Seminario de Postgrado, Nuevo León, MX. 9 p.
- SAS (SAS Institute Inc, USA). 1,999.** Statistic Analysis Systems Inc. Versión 8. Cary, NC, USA.
- Salgado Raudez, JC; Olivera Martínez, LM. 2003.** Efecto del manejo selectivo de malezas y coberturas sobre el crecimiento y rendimiento del Café (*Coffea arabica* L.) después del recepo. Tesis. Ing. agr. Managua, NI. UNA. 50 p.
- Sequi, P; Piaggese, A. 2004.** Microelementos en la nutrición vegetal. Roma, IT. VALAGRO, S.A. 72 p.
- Silvano Ltda., CO. 2004.** Estudio de la cobertura del dosel con fotografía hemisférica (en línea). Colombia. Consultado 08 mar. 2012. Disponible en [http://www.silvanoforestal.com/Files/Cobertura\\_dosel.PDF](http://www.silvanoforestal.com/Files/Cobertura_dosel.PDF)
- Smith, TM; Smith, RL. 2007.** Ecología. 6 ed. Madrid, ES. Pearson educación, S.A. 776 p.
- Suárez, A. 2012.** Manual de muestreo foliar para recomendación de fertilización. La Lima, HO. 61 p.
- Urrego Hernández, DF; Pérez Lara, MC. 2013.** Fotografías hemisféricas y estimación de la biomasa forestal aérea de los bosques de roble de la reserva forestal Quinini. 10 p.
- Velásquez Vásquez, SE; González Matey, JI. 2012.** Crecimiento de los árboles de sombra y su contribución a una producción agroecológica en sistemas cafetaleros del departamento de Masaya, Nicaragua. Tesis. Ing. for. Managua, NI. UNA. 59 p.
- Zianis, D; Muukkonen, P; Mäkipää, R; Mencuccini, M. 2005.** *Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe*. 63 p.

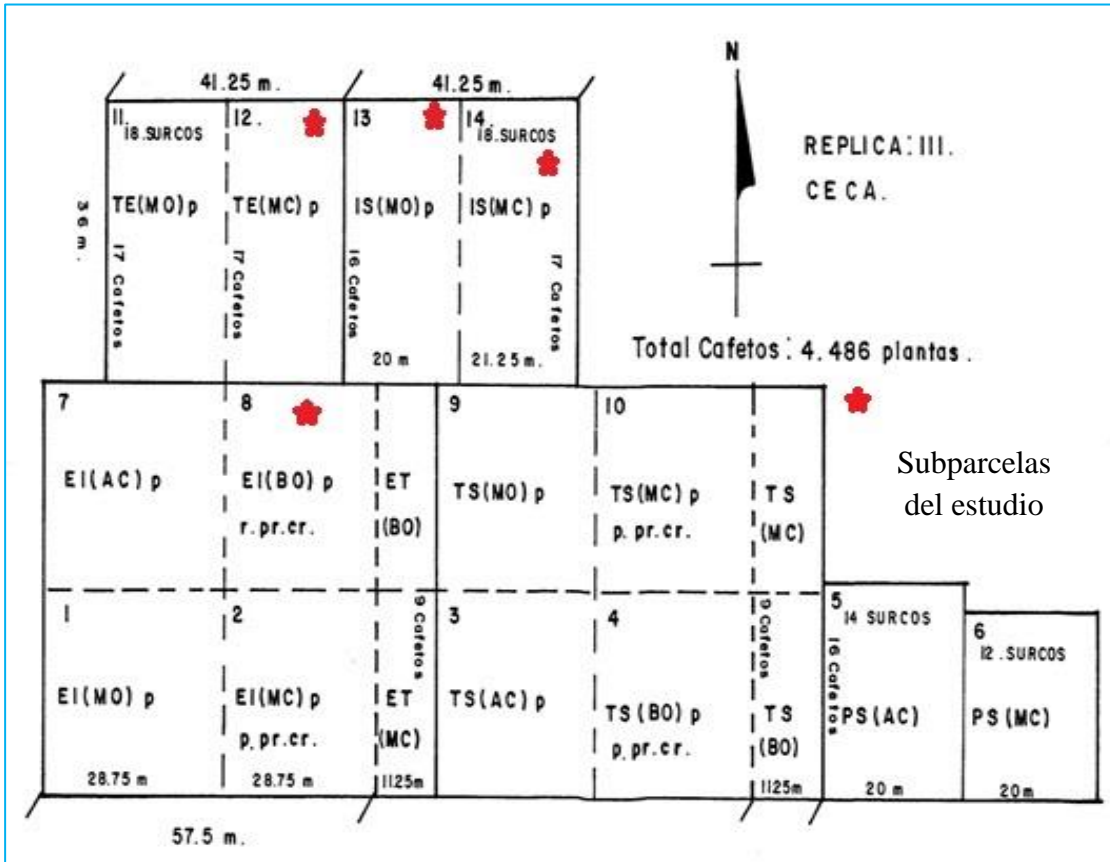
# **VIII.- ANEXOS**



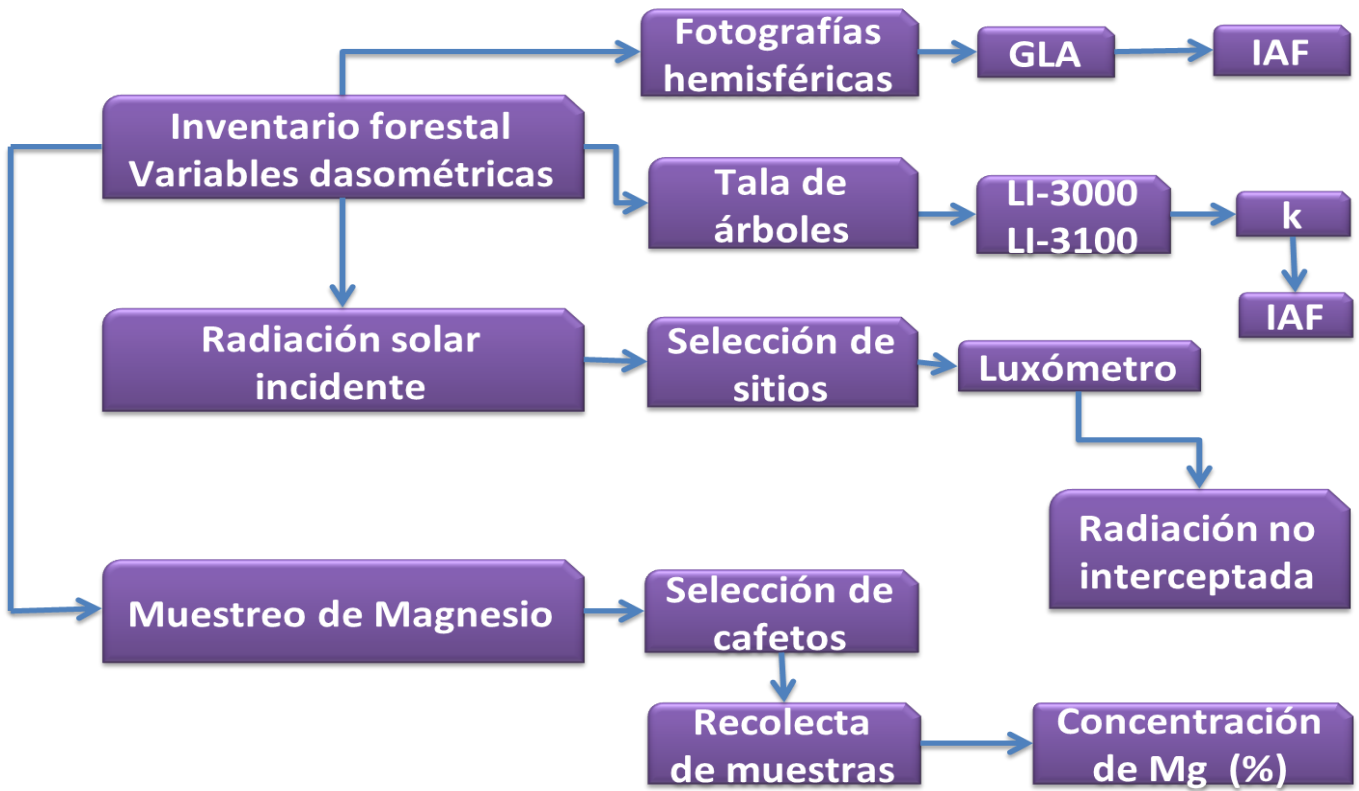
**Anexo 1.** Ensayo experimental. Réplica El Mamón, Jardín botánico, Masatepe



Anexo 2. Ensayo experimental. Réplica Campos Azules, Masatepe



**Anexo 3.** Estrategia metodológica del estudio



**Anexo 4.** Árboles de sombra por especie en cada subparcela en áreas de CENECOOP

Combinación de Sombra	Nivel de insumo	Especie	CENECOOP	
			Área Parcela (m <sup>2</sup> )	Árboles por parcela
SSIL	CI	SS	850	4
		IL		10
	OI	SS	750	7
		IL		16
	CM	SS	750	12
		IL		9
	OM	SS	800	4
		IL		10
SGTR	OM	SG	850	7
		TR		7
	CM	SG	750	5
		TR		11
	OI	SG	750	9
		TR		7
	CI	SG	850	6
		TR		10

**Anexo 5.** Árboles de sombra por especie en cada subparcela en áreas de CECA

Combinación de Sombra	Nivel de insumo	Especie	CECA	
			Área Parcela (m <sup>2</sup> )	Árboles por parcela
SSIL	OM	SS	1087,5	10
		IL		13
SSTR	CM	SS	765	7
		TR		9
ILSG	OI	IL	720	7
		SG		10
	CM	IL	720	14
		SG		3

**Anexo 6.** Valores de DN, Altura, Área basal y Volumen de las especies inventariadas en CENECOOP y CECA

Réplica	Sistema	Especie	DN(cm)	Altura (m)	AB (m <sup>2</sup> )	Vol (m <sup>3</sup> )
CENECOOP	SGTR	<i>S. glauca</i>	23,414	13,050	1,170	10,806
		<i>T. rosea</i>	26,235	16,183	1,944	22,874
	SSIL	<i>S. saman</i>	16,241	7,253	0,601	3,321
		<i>I. laurina</i>	26,354	8,100	2,773	15,500
<b>Total</b>			<b>23,693</b>	<b>11,038</b>	<b>6,488</b>	<b>52,501</b>
CECA	SGIL	<i>S. glauca</i>	26,519	11,900	1,185	10,051
		<i>I. laurina</i>	37,694	11,712	1,540	12,848
	SSIL	<i>S. saman</i>	20,780	10,500	0,379	3,125
		<i>I. laurina</i>	33,371	10,558	1,342	12,117
	SSTR	<i>S. saman</i>	26,214	13,607	0,416	4,549
		<i>T. rosea</i>	28,533	11,083	0,590	4,623
<b>Total</b>			<b>29,162</b>	<b>11,499</b>	<b>5,452</b>	<b>47,313</b>
<b>Total general</b>			<b>25,622</b>	<b>11,200</b>	<b>11,941</b>	<b>99,814</b>

**Anexo 7.** Valores de Coeficiente de secado ( $k$ ) de *Inga laurina*, *Samanea saman*,  
*Simarouba glauca* y *Tabebuia rosea*

<b>Especie</b>	<b>P. Fresco (g)</b>	<b>P. Seco (g)</b>	<b>PF(300 hojas) (kg)</b>	<b>PS(300 hojas) (kg)</b>	<b><math>k</math></b>
<i>I. laurina</i> 1	693	409	0,231	0,136	0,590
<i>I. laurina</i> 2	1415	875	0,472	0,292	0,618
<i>I. laurina</i> 3	774	464	0,258	0,155	0,599
<i>I. laurina</i> 4	1144	577	0,381	0,192	0,504
<i>S. saman</i> 1	2137	1086	0,712	0,362	0,508
<i>S. saman</i> 2	3694	2359	1,231	0,786	0,639
<i>S. saman</i> 3	2642	1344	0,881	0,448	0,509
<i>S. saman</i> 4	1868	986	0,623	0,329	0,528
<i>T. rosea</i> 1	2204	1292	0,735	0,431	0,586
<i>T. rosea</i> 2	1712	595	0,571	0,198	0,348
<i>T. rosea</i> 3	2442	909	0,814	0,303	0,372
<i>T. rosea</i> 4	2794	1078,4	0,931	0,359	0,386
<i>S. glauca</i> 1	1382	607	0,461	0,202	0,439
<i>S. glauca</i> 2	1145	583	0,382	0,194	0,509
<i>S. glauca</i> 3	1498	692	0,499	0,231	0,462
<i>S. glauca</i> 4	1080	522	0,360	0,174	0,483

**Anexo 8. Manejo de la fertilidad del suelo en el Ensayo de sistemas agroforestales con Café, Masatepe**

Nivel de insumo	2003	2007-2008	2009-2012
Orgánico intensivo	Marzo: 5 lb de pulpa de Café fresca por planta		
	Agosto: 6 libras de Gallinaza por planta.	4 libras de Gallinaza por planta.	4 libras compost “Bioperla” (Granza de arroz, pulpa Café, estiércol, hojas)
	Una aplicación mensual de Biofermentados 100 cc/litro de agua.		
Orgánico moderado	Marzo: 5 libras de pulpa de Café fresca por planta		
Convencional intensivo	Julio: 50 gramos /planta de la fórmula 18-6-12-4-0.2. Septiembre: 70 gramos /planta de la fórmula 12-30-10	Julio: 38 gramos/planta de la fórmula 27-9-18 Agosto: 70 gramos/planta de la fórmula 12-30-10	
	Mediados Octubre: 40 gramos de Urea + 10 gramos de Muriato de Potasio.		
	4 aplicaciones foliares: 5.6 gramos de urea + 1.25 gramos de Zinc + 1.5 gramos de Boro/l agua + 1 cc adherente/l agua (Marzo, Junio, Agosto, Oct.)		
Convencional moderado	Agosto: 25 gramos /planta de la fórmula 18-6-12-4-0.2 Septiembre: 35 gramos /planta de 12-30-10	Julio: 19.5 gramos por planta de la fórmula 27-9-18 Agosto: 35 gramos por planta de la fórmula 12-30-10	
	Mediados Octubre: 20 gramos de Urea + 5 gramos de Muriato de Potasio.		
	2 Aplicaciones foliares: 5.6 gramos de urea + 1.25 gramos de Zinc + 1.5 gramos de Boro por litro de agua. + 1 cc adherente/litro de agua invierno (Marzo y Octubre)		

