

**EFFECTO DEL SOMBREAMIENTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA FISIOLOGIA
DEL CAFÉ (*Coffea arabica L*) VARIEDAD CASTILLO® EN EL MUNICIPIO DE LA
FLORIDA ECOTOPO 221A DE NARIÑO.**

JOSÉ JULIÁN APRAEZ MUÑOZ. I.A.

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN PRODUCCIÓN DE
CULTIVOS
SAN JUAN DE PASTO**

2016

**EFFECTO DEL SOMBREAMIENTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA FISIOLOGIA
DEL CAFÉ (*Coffea arabica L*) VARIEDAD CASTILLO ® EN EL MUNICIPIO DE LA
FLORIDA ECOTOPO 221A DE NARIÑO.**

JOSÉ JULIÁN APRAEZ MUÑOZ. I.A.

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ciencias Agrarias con Énfasis en Producción de Cultivos.**

Asesor:

Hernando Artemio Criollo Escobar. I.A. Ph. D.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS

**MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN PRODUCCIÓN DE
CULTIVOS**

SAN JUAN DE PASTO

2016

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1º del acuerdo nº 324 de octubre 11 de 1966 emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

JAVIER GARCÍA ALZATE. I.A. Ph. D.

Jurado delegado

LUIS FERNANDO GOMEZ GIL. I.A. Ph. D.

Jurado

TULIO CESAR LAGOS BURBANO. I.A. Ph. D.

Jurado

HERNANDO ARTEMIO CRIOLLO ESCOBAR. I.A. Ph. D.

Presidente

San Juan de Pasto, Mayo de 2016.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo y al dueño de todo lo que existe sobre la faz de la tierra a DIOS.

A mis padres, hermana, sobrina y familiares que siempre están ahí cuando los necesito.

A mi novia quien me ayudo en este sueño.

Al Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos de la Facultad de Ciencias

Agrícolas de la Universidad de Nariño.

A la Universidad de Nariño.

Al Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado en Ciencias Agrarias.

A los profesores:

Hernando Criollo Escobar I.A. PhD.

Tulio Cesar Lagos Burbano I.A. PhD.

Javier García Álzate I.A. PhD.

Luis Fernando Gómez Gil I.A. PhD.

A mis compañeros:

Camilo Arévalo Martínez. I. AI.

Claudia Criollo Escobar I. AI.

A todas aquellas personas que de alguna manera u otra contribuyeron al desarrollo de esta

investigación.

Dedicado a:

Mis padres.

Mis hermanos.

Mi sobrina.

Mi novia.

Mis familiares.

Mis amigos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. MARCO TEÓRICO.....	21
1.1 Generalidades del cultivo.....	21
<i>1.1.1 Situación actual de la caficultura en Colombia</i>	21
<i>1.1.2 Sistema actual de la caficultura en Nariño.</i>	22
<i>1.1.3. Diversidad de zonas cafeteras en Colombia y algunas características</i>	23
<i>1.1.4 Fenología del café</i>	25
<i>1.1.5 Origen de los órganos vegetativos aéreos del cafeto</i>	26
<i>1.1.6 Generalidades de la variedad Castillo®</i>	27
1.2 Efectos de la sombra sobre el cultivo de café	29
1.3 Comportamiento del cultivo de café bajo diferentes niveles de sombrío	32
1.4 Efecto de la luz sobre algunas características de las hojas.....	36
1.5 Cultivo del café bajo sistemas forestales	37
2. MATERIALES Y MÉTODOS	41
2.1 Localización	41
2.2 Variedad a sembrar	41
2.3 Sistema de siembra.....	41
2.4 Manejo agronómico del cultivo	42
2.5 Diseño experimental.....	43
2.6 Variables evaluadas.....	44
<i>2.6.1 Variables ambientales</i>	44

2.6.2	<i>Humedad y temperatura del suelo</i>	44
2.6.3	<i>Temperatura ambiental</i>	44
2.6.4	<i>Humedad relativa</i>	44
2.6.5	<i>Radiación Fotosintéticamente Activa</i>	44
2.6.6	<i>Variables de crecimiento</i>	45
2.6.6.1	<i>Área foliar</i>	45
2.6.6.2	<i>Índice de área foliar</i>	46
2.6.6.3	<i>Intensidad de asimilación neta</i>	46
2.6.6.4	<i>Índice de crecimiento relativo</i>	47
2.6.6.5	<i>Índice de crecimiento del cultivo (icc)</i>	47
2.6.6.6	<i>Altura de la planta (AP)</i>	47
2.6.6.7	<i>Biomasa seca</i>	48
2.6.6.8	<i>Longitud de ramas</i>	48
2.6.6.9	<i>Número de nudos por rama</i>	48
2.6.7	<i>Análisis estadístico</i>	48
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1	<i>Dinámica de las Variables Ambientales</i>	50
3.1.1	<i>Humedad del suelo y Temperatura del suelo</i>	50
3.1.2	<i>Temperatura Ambiental</i>	52
3.1.3	<i>Humedad Relativa</i>	53
3.1.4	<i>Radiación fotosintéticamente activa (RFA)</i>	54
3.2	<i>Índices de Crecimiento</i>	56
3.2.1	<i>Variables de Crecimiento</i>	56
3.2.1.1	<i>Área foliar</i>	57

3.2.1.2 Índice de área foliar.	59
3.2.1.3 Intensidad De Asimilación Neta.	62
3.2.1.4 Índice de crecimiento relativo.	64
3.2.1.5 Índice de crecimiento del cultivo.	67
3.2.1.6 Altura de Planta.....	69
3.2.1.7 Biomasa seca	71
3.2.1.8 Longitud de ramas	74
3.2.1.9 Numero de nudos por rama.	76
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dosis de fertilizante en kg/ha/año según el tratamiento que corresponda.....	42
Tabla 2. Relación de tratamientos y su correspondiente porcentaje de sombrío.....	43
Tabla 3. Análisis de Varianza para las variables altura de planta, biomasa seca (raíz, tallo, hojas, total), longitud de ramas (estrato bajo, medio, alto), número de nudos por rama (estrato bajo, medio, alto) en cuatro tratamientos correspondientes a diferentes niveles de sombreado del cultivo de café año 2015.	57
Tabla 4. Prueba de comparación de medias para las variables altura de planta, biomasa seca de hojas, tallo, raíz, y total, Longitud de ramas en el tercio bajo, medio, alto y número de nudos por rama, obtenido con diferentes niveles de sombreado en el ecotopo 221A (Nariño) 2015.....	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comportamiento de la variable humedad del suelo (promedio mensual) en los cuatro tratamientos; b) Comportamiento de la variable temperatura del suelo (promedio mensual) en los cuatro tratamientos en el ciclo del cultivo evaluado.....	50
Figura 2. a) Comportamiento de la variable temperatura máxima en el día para los tratamientos evaluados; b) Comportamiento de la variable temperatura mínima en el día para los tratamientos evaluados. c) Comportamiento de la variable temperatura máxima en la noche para los tratamientos evaluados; d) Comportamiento de la variable temperatura mínima en la noche para los tratamientos evaluados.	52
Figura 3. Comportamiento de la variable humedad relativa promedio, en los cuatro tratamientos, en el ciclo del cultivo evaluado.	53
Figura 4. Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 8am. b) Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 1pm.c) Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 5pm.....	55
Figura 5. Comportamiento de la variable Área Foliar durante los primeros doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.....	58
Figura 6. Comportamiento de la variable índice de área foliar en los doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.....	60

Figura 7. Comportamiento de la variable intensidad de asimilación neta en los doce primeros meses del ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos. 63

Figura 8. Comportamiento de la variable índice de crecimiento relativo en los doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados..... 65

Figura 9. Comportamiento de la variable índice de crecimiento de cultivo en los doce meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados..... 67

Figura 10. Comportamiento de la variable Biomasa seca de Total, Raiz, Tallo, Hojas, en los tratamientos T1, T2, T3 y T4..... 72

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en la vereda Santa Ana corregimiento de Matituy municipio de La Florida ubicado a $1^{\circ}23'58.3''$ N. y $77^{\circ}18'44.12''$ O. y tuvo como objetivo la evaluación del efecto de diferentes niveles de sombra, sobre variables fisiológicas relacionadas con el crecimiento del cultivo de café (*Coffea arabica L.*) variedad Castillo® durante el primer año de crecimiento en campo; se evaluaron diferentes porcentajes de sombreado, mediante la instalación de poli sombras para obtener los tratamientos de 0, 35, 50 y 65% de sombra.

Mediante un análisis de bloques completos al azar, se evaluó el comportamiento de diferentes variables fisiológicas, índice de asimilación neta (IAN), índice de crecimiento de cultivo (ICC) e índice de crecimiento relativo (ICR), durante el primer año de cultivo de café, bajo diferentes tratamientos correspondientes a diferentes niveles de sombreado 0%, 35%, 50% y 65%. En las variables de índice de asimilación neta e índice de crecimiento relativo, el tratamiento sembrado con 35% de sombrero, presenta los mayores valores en las variables de índices fisiológicos en relación a los tratamientos de 50 y 65% de sombrero, respectivamente) los cuales no presentaron mayores variaciones entre si y el tratamiento testigo presenta valores por encima de los tratamientos 50 y 65% de sombrero. Para los índices de crecimiento de cultivo, área foliar e índice de área foliar se presentan valores mayores en los tratamientos sembrados bajo sombrero de 65% (0,48), 35 y 50% (0,48) que el tratamiento sembrado a libre exposición solar (0,19); las plantas sembradas bajo 35% de sombrero, presentan mayores valores durante el periodo evaluado, en comparación a los tratamientos 50, 65% de sombra y al tratamiento testigo, sembrado bajo libre exposición solar, los cuales se comportan de manera similar; el análisis de varianza presenta diferencias estadísticas peso seco de raíz (13,91g; 68,83 g; 11,83 g), longitud de ramas del estrato alto (15,85 cm; 59,16 cm; 9,83 cm), y altura de planta (59,16 cm; 59,33 cm;

68,83 cm;) para los tratamientos 35, 50 y 65% de sombra respectivamente; dentro de las variables fisiológicas donde se incluye la biomasa seca de hojas, tallos, total y longitud de ramas del tercio medio fueron favorecidas en los tratamientos correspondientes a 65 y 35 % de sombreado presentando así diferencias estadísticas significativas.

Palabras clave. Radiación fotosintéticamente activa, sombrero, fisiología de cultivo, crecimiento vegetal, índices fisiológicos.

ABSTRACT

This research was conducted in the Santa Ana district of Matituy municipality of La Florida located at $1^{\circ} 23'58.3''$ N and $77^{\circ} 18'44.12''$ O. and aimed at evaluating the effect of different levels shadow on physiological variables related to the growth of the coffee crop (*Coffea arabica* L.) variety Castillo® during the first year of growth in the field; different shading percentages by installing poly shadows were evaluated for treatments shade of 0, 35, 50 and 65 %

Through an analysis of randomized complete block, the behavior of different physiological variables, index, net assimilation (IAN), growth rate culture (ICC) and relative growth rate (ICR) was evaluated during the first year of cultivation coffee, under different treatments corresponding to different shading levels 0%, 35%, 50% and 65%. In the index variables net assimilation rate and relative growth rate, treatment planted with 35% bleak, presents the highest values in the variables of physiological indices in relation to treatments of 50 and 65% of somber, respectively) which They did not show greater variations each other and the control treatment has values above 50 treatments and 65% bleak. For crop growth rates, leaf area and leaf area index higher values are presented in treatments planted under shade of 65% (0.48), 35 and 50% (0.48) treatment free exposure sown Solar (0,19); plants grown under 35% of somber, have higher values during the period under review, compared to 50 treatments, 65% shade and the control treatment, sown under free sun exposure, which behave similarly; analysis of variance has statistical differences root dry weight (13,91g; 68.83 g; 11.83 g), length of branches in the upper stratum (15.85 cm 59.16 cm 9.83 cm) and plant height (59.16 cm 59.33 cm 68.83 cm) for the treatments 35, 50 and 65% shade respectively; within physiological variables where the dry biomass of leaves, stems, branches and total length midface included were favored in treatments corresponding to 65 and 35% shade thus presenting significant statistical differences.

Keywords: photosynthetically active radiation, gloomy, crop physiology, plant growth, physiological indices.

INTRODUCCION

El café en Colombia es uno de los cultivos más importantes, por ser uno de los principales generadores de divisas, representando el 12% del producto interno bruto. A pesar de la importancia del cultivo, en el departamento de Nariño se ha presentado una disminución del 0,85% en el área sembrada, un 8,97% en la producción y un 8,11% en el rendimiento. Hay 31.000 hectáreas sembradas, en 40 de los 64 municipios del departamento. La producción en esta parte del país representa el 3,5% de la producción cafetera Nacional (Agrocadenas, 2014).

La producción de café en Colombia, durante el tercer trimestre del 2014 creció 21,6% frente a igual período de 2013, alcanzando 8,8 millones de sacos en los primeros nueve meses del año. Este comportamiento positivo fue impulsado por el buen clima que favoreció los picos de productividad del parque cafetero, y por la entrada en producción de aproximadamente 117 mil hectáreas que fueron renovadas en los últimos años (Agrocadenas, 2014).

La zona cafetera colombiana se caracteriza por presentar una alta nubosidad durante el día, que puede ser estimada a partir de los registros del brillo solar y por una disponibilidad de agua en el suelo, variable cuantificada mediante los balances hídricos regionales (Jaramillo, 2005). Estas dos condiciones, determinantes de la producción de café, se deben tener en cuenta para orientar las prácticas en el cultivo, entre ellas el sombrero.

De acuerdo con Ramírez *et al.* (2002) en la última década, la temperatura y la precipitación se han modificado como consecuencia del cambio climático, cambios que se han manifestado en la reducción de la producción, hasta en un 65%. Se considera que el aumento en la concentración de CO₂ eleva la tasa fotosintética en las plantas y por lo mismo, se incrementa el rendimiento (Tubielo *et al.*, 2000); sin embargo, se debe tener en cuenta que la temperatura mínima y máxima se han incrementado en 0,35 y 1,13°C, respectivamente (Peng *et al.*, 2004), y que estos incrementos en la temperatura pueden causar disminuciones en el rendimiento de varios

cultivos (Pimentel, 1991).

La calidad y la cantidad de radiación solar afecta el crecimiento y el desarrollo de las plantas, el funcionamiento de los estomas y las respuestas fisiológicas (Lee *et. al.*, 2007); en el café, la disponibilidad de radiación afecta de forma muy significativa la producción, especialmente si el sistema de producción se hace bajo árboles de sombrío.

Las observaciones sobre la cantidad de sombra necesaria para el café en sistemas agroforestales y la variabilidad expresada en su heterogeneidad espacial y temporal es muy escasa y los resultados de los estudios se han limitado a algunas localidades de la zona cafetera de Colombia (Farfan, 2007).

En el cultivo de café, se considera como un límite de disponibilidad hídrica, una cantidad de 150 mm acumulados en tres meses continuos, asociada a unos altos niveles de radiación solar, condiciones en las cuales se recomienda establecer los cafetales con árboles de sombrío (Camargo y Pereira, 1994). El sombrío también es recomendable si el relieve es quebrado con pendientes fuertes (>50%), con suelos susceptibles a la erosión, suelos poco profundos y poco estructurados, con bajos contenidos de materia orgánica y baja fertilidad natural, suelos con mal drenaje, con baja permeabilidad y baja retención de humedad (Beer *et al.*, 1998). Se ha establecido que dependiendo de la localidad, el nivel de sombrío óptimo fluctúa entre 35 y 45% (Farfan, 2007), cuando se emplea una sola especie de árbol y con regulación permanente de la sombra.

Tradicionalmente se ha pensado que el comportamiento de los cafetos es igual bajo cualquier nivel de sombra, lo que equivaldría a decir que el café produce lo mismo bajo cualquier cantidad de luz disponible, independientemente de las condiciones climáticas de la región; el concepto hay que replantearlo, ya que las plantas requieren de diferentes proporciones de sombrío, dependiendo de la ubicación geográfica (latitud, altitud) y de la disponibilidad de

radiación solar y de agua en el suelo (Farfan, 2007).

Por lo tanto, es requisito básico en los sistemas de cultivo de café con sombrío, determinar el denominado “porcentaje de sombrío óptimo” o “grado de sombra adecuado”, el cual depende básicamente de la localidad, de la radiación solar anual (cobertura de nubes o nubosidad) y de las necesidades del cultivo, pues éste será el reflejo de las reducciones o incrementos de la producción, al establecer el café con el asocio de árboles (Farfan, 2007).

Las principales características de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), que influyen en el comportamiento biológico son la calidad (diferentes rangos de longitudes de onda que constituyen el espectro electromagnético), la intensidad (cantidad de energía que alcanza una superficie en unidad de tiempo) y la duración (tiempo de incidencia de la radiación solar) (Jaramillo, 2005). Cuando la radiación se expresa como un porcentaje de la radiación incidente en la parte externa del cultivo, se debe asociar con la cantidad real de radiación medida, que ingresa al agrosistema.

En general, el transcurso anual del brillo solar en la zona cafetera colombiana, sigue una onda opuesta a la distribución de las lluvias. La nubosidad está determinada por la presencia de la Zona de Confluencia Intertropical, que es la región del globo terrestre donde convergen los vientos alisos del hemisferio norte con los del hemisferio sur, caracterizado por grandes masa de aire cálido y húmedo además de los movimientos locales de las masas de aire que se originan dentro de las montañas, denominadas circulaciones valle - montaña – valle (Jaramillo, 2005).

En Colombia, los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena la distribución del brillo solar presenta sus valores máximos en los meses de menor lluvia, como son enero-febrero y julio-agosto. En las regiones de los Llanos Orientales y la Costa Atlántica la distribución tiende a presentar el valor máximo en diciembre-enero y los valores mínimos en junio-julio. Los mayores valores de brillo solar se registran en la península de La Guajira, con cantidades anuales próximas

a las 3.000 horas, y los valores más bajos se observan en el litoral Pacífico con 900 horas al año (Chavez y Jaramillo, 1997).

Considerando la importancia de los niveles de radiación que llegan hasta las plantas de café en su comportamiento fisiológico, el presente estudio se planteó para evaluar el efecto de cuatro (4) niveles de sombra, obtenidos con la utilización de polisombras, sobre el crecimiento y fisiología del cultivo de café (*Coffea arabica*) variedad Castillo® el Tambo en el departamento de Nariño.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades del cultivo

1.1.1 Situación actual de la caficultura en Colombia

El café (*Coffea arábica L.*) pertenece a la familia *Rubiaceae*, es una planta que alcanza los 12 metros de altura en estado silvestre, con hojas opuestas, ovales u oblongas de color verde oscuro, las inflorescencias son axilares, produce una drupa de color rojo brillante, que contiene dos semillas. Los frutos de *C. arábica* contienen menos cafeína que otras especies cultivadas comercialmente (Ramirez *et al.* 2010).

Aunque el café es originario del África del este, su cultivo tiene gran importancia económica en África y América; Brasil, Vietnam, Colombia y Costa Rica son los principales productores mundiales de café. Estados Unidos representa el mayor mercado mundial de café, seguido de Brasil, siendo este país así mismo, el mayor productor de esta especie en el mundo. Los países escandinavos y Finlandia son los lugares donde se consume más café por número de habitantes (Sadegian y Gonzales, 2012).

El café que se produce en Colombia es 100% arábica y necesita condiciones climáticas específicas para su producción. Aunque es un producto propio de la zona tropical, su cultivo exige, además, condiciones especiales de suelo, temperatura, precipitación y altitud sobre el nivel del mar (Jaramillo, 2011).

En Colombia, las plantaciones de café se desarrollan bajo diferentes sistemas de cultivo que incluyen plantaciones tradicionales de baja productividad y los cultivos tecnificados, expuestos al sol, a la sombra y a la sombra parcial (denominada semisombra). Los cafeteros colombianos en cualquier escenario cultivan únicamente café de la especie Arábica, utilizando variedades que se adaptan a sus condiciones específicas de producción, que incluyen las conocidas como Típica, Borbón, Caturra, Colombia, Castillo o tabí (Gómez *et al.* 2000).

En cuanto a las exportaciones colombianas de café, las ventas aumentaron 9,1% al pasar de 2,39 millones de sacos en el tercer trimestre de 2013 a 2,61 millones de sacos en el mismo período de 2014. Frente al año 2015, las exportaciones registradas hasta septiembre de 2014 alcanzaron los 7,9 millones de sacos, lo que se traduce en un incremento del 17,4% frente a las ventas externas en el mismo período del año anterior (Agrocadenas, 2014).

1.1.2 Sistema actual de la caficultura en Nariño.

La mayor parte de los cultivos de café en Nariño se encuentran en pequeños predios o minifundios en alturas por encima de 1.700 m. s. n. m. Por su parte, la comercialización del grano se efectúa en gran medida a través de las Cooperativas de Caficultores del Norte y Occidente del departamento (Jaramillo *et., al.* 2011)

El 40% del suelo de la zona cafetera nariñense se encuentra cultivado con café. El restante 60% cuenta con cultivos de caña, maíz, frijol, plátano, reservas forestales y pastos no tecnificados. La caficultura de Nariño se caracteriza por ser de sombra con predominio de las variedades Caturra y Castillo. La mayor parte de los cultivos se encuentran en pequeños predios o minifundios, correspondientes a una unidad agrícola familiar (UAF) de 2500m² (Jaramillo *et., al.* 2011).

La ubicación de Nariño en Colombia hace de su zona cafetera un lugar sin duda especial; las condiciones en el área de producción de café en el departamento; presentan una combinación de factores, tales como la radiación solar que oscila alrededor de 1666 horas, durante el año, los ciclos de lluvia de 700 mm/año, los suelos con alto contenido de materia orgánica y temperaturas medias de 19,9°C, con valores promedio máximo de 25,9°C y mínima de 16°C; todo esto en conjunto, hacen posible cultivar el café (Jaramillo *et., al.* 2011).

En la mayoría de las localidades de la zona Andina se presentan entre 1.600 y 1.800 horas de brillo solar al año. El promedio del brillo solar anual para la región está próximo a las 1.550

horas al año, que representa un 36% del brillo solar máximo astronómico, con alta presencia de nubes y, en consecuencia, altas proporciones de radiación difusa. Se observan valores extremos próximos a 2.150 horas (49% del brillo solar máximo) y 1.050 horas al año (24% del brillo solar astronómicamente posible) (Villalobos, 2004).

Los cultivos de café en Nariño se localizan entre los 1400 y los 2400 m.s.n.m.; producir café a alturas superiores a los 2300 metros sobre el nivel del mar, podría ser casi imposible si el calor que se acumula durante el día en el fondo de los cañones y de los profundos valles no ascendiera en las noches para atenuar el frío de las partes más altas de las montañas (Ramírez *et. al.*, 2010).

Las condiciones agroecológicas donde se ubica la caficultura, unida a las variedades cultivadas y al sistema de beneficio utilizado, permiten obtener cafés de alta calidad para atender el nicho de mercado de cafés especiales. Desde el punto de vista gremial, el Comité Departamental de Cafeteros de Nariño representa los intereses de 20 comités municipales de cafeteros y los caficultores nariñenses asociados en ellos (Jaramillo *et. al.* 2011).

Las bajas temperaturas, han demostrado en otros cultivos, tener una correlación positiva con la alta retención de ácidos y azúcares de las plantas que, en el caso del café, son importantes para los atributos de acidez, dulzor y suavidad de la bebida. La planta de café, al reaccionar ante las menores temperaturas, presenta un metabolismo más lento, protegiéndose así de un entorno que considera adverso. De esta manera se favorece el desarrollo de ciertos grupos de moléculas, como las proteínas y los azúcares, tanto por su cantidad como por su tipo específico (Ramírez *et. al.*, 2010).

1.1.3. Diversidad de zonas cafeteras en Colombia y algunas características

En Colombia, la tendencia general de la zona cafetera central (latitudes entre 3° y 7° N) es la de presentar durante el año dos períodos secos (enero-febrero y julio-agosto) y dos húmedos

(abril-mayo y octubre-noviembre); para las regiones de las zonas Norte (latitudes mayores a 7° N), Sur (latitudes menores a 3° N) y Oriente del país, la tendencia general es a presentar en el año una sola estación seca (Jaramillo, 2005). En la región cafetera norte, por ejemplo, Pueblo Bello (Cesar) (10°25' N), se presenta una estación seca pronunciada de enero a abril, con un déficit hídrico de 238mm (Cenicafe, 2004), y en la región sur, por ejemplo, Consacá (Nariño) (01°15' N) presenta una estación seca marcada, de julio a septiembre, con un déficit hídrico de 266mm, durante tres meses continuos (Jaramillo, 2005).

En las regiones cafeteras de Nariño, se presentan diferencias entre los ciclos de lluvias, de cosecha y la altitud a la que se produce el café. En las zonas del sur del país, cercanas a la línea ecuatorial, la producción de café se da bajo una mayor altitud y a temperaturas que son menos elevadas en comparación a las otras zonas cafeteras en Colombia. Los cafés producidos en regiones específicas como Nariño o Cauca, Huila o Sur del Tolima, poseen ciclos de cosecha particulares, son cafés con una mayor acidez que poseen ciertas características especiales (Jaramillo *et. al.* 2011).

En el centro del país se produce la cosecha cafetera colombiana de mayor importancia en volumen. En el eje cafetero, departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y el Norte del departamento del Valle (Paisaje Cultural Cafetero colombiano), se encuentran cultivos de café altamente extensivos que conviven con los de productores más pequeños y tradicionales. Estas zonas al igual que las de Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y el Norte del Tolima tienen más de dos ciclos marcados de cosecha y continuas cosechas pequeñas (pepeos) lo que garantiza una producción de café constante durante buena parte del año, realizando hasta ocho visitas al año para cosechar los granos maduros de un mismo árbol (Sadegian y Gonzales, 2012).

La zona cafetera en el Norte del país a latitudes superiores a los 9°, tienen características climáticas similares a los principales países productores centroamericanos de café, en donde la

producción se da en altitudes inferiores y a temperaturas superiores. Los cultivos sembrados en regiones como la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía del Perijá o en los departamentos de Casanare, Santander y Norte de Santander, por su oferta climática, tienden a estar más expuestos a la radiación solar y, en consecuencia, los cultivadores eligen sistemas agroforestales en asocio con los cultivos para que sean frecuentemente protegidos por diferentes niveles de sombrero. Estos cafés, en sus cualidades organolépticas presentan una acidez menor pero un mayor cuerpo (Arcila *et al.* 2001).

1.1.4 Fenología del café

De acuerdo a la forma como se desarrolla la planta de café en Colombia, puede considerarse que el desarrollo vegetativo, es decir, la formación de raíces, ramas, nudos y hojas, comprende tres etapas: germinación a trasplante (2 meses), almácigo (5-6 meses) y siembra definitiva a primera floración (11 meses). Hasta este momento se considera una etapa netamente vegetativa y de ahí en adelante, las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo transcurren simultáneamente durante el resto de vida de la planta. El cafeto es un arbusto perenne cuyo ciclo de vida en condiciones comerciales, como en el eje cafetero, alcanza hasta 20-25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo (Raven *et al.*, 1999).

Durante su ciclo de vida, la planta destina una parte del mismo ciclo para la formación de estructuras no reproductivas como las raíces, las ramas, los nudos y las hojas, actividad denominada desarrollo vegetativo. La fase durante la cual ocurre la formación y desarrollo de estructuras de reproducción como las flores y los frutos se denomina desarrollo reproductivo. Después de varios años de actividad, la planta envejece y entra en un proceso de deterioro que se denomina fase de senescencia o envejecimiento (Raven *et al.*, 1999).

En los cultivos anuales se considera como fase vegetativa el tiempo transcurrido desde la germinación hasta la primera floración. En el caso de especies perennes y arbustivas como el

cafeto, la definición de la fase vegetativa es bastante compleja, debido a que el crecimiento vegetativo, por ejemplo, la formación de nudos y hojas y la generación de nuevas raíces, ocurre durante toda la vida de la planta y en la mayor parte del tiempo está intercalado con el crecimiento reproductivo (Arcila, 2009).

1.1.5 Origen de los órganos vegetativos aéreos del cafeto

El crecimiento de la parte aérea del cafeto se genera a partir de las células meristemáticas ubicadas en el ápice del tallo y de las ramas (yemas apicales) y en las axilas de las hojas (yemas laterales, yemas axilares y yemas seriadas). A partir de los meristemas de las yemas se desarrollan los primordios de nudos, hojas, brotes, ramas y flores. El ápice del tallo es el responsable de la formación de nudos, hojas y del crecimiento en altura de la planta (crecimiento ortotrópico), (Cannell, 1985; Moens, 1968).

En cada nudo formado en el tallo se desarrollan dos axilas foliares opuestas y en cada una de las axilas se originan de cuatro a cinco yemas ordenadas en forma lineal, de mayor a menor, razón por la cual se les denomina yemas seriadas (yemas laterales o axilares). La primera, que a su vez es la de mayor edad, da origen a un par de brotes que crecen horizontalmente (ramas primarias). La siguiente yema de la serie, origina brotes verticales o “chupones”, mientras que las otras yemas permanecen latentes o eventualmente, forman flores y frutos caulinares, es decir, que crecen en el tallo y en las ramas (Arcila, 2004).

Estas yemas laterales son de edades uniformes y dan origen principalmente a flores, en la medida que las condiciones ambientales sean propicias. En cada yema se forman entre cuatro y seis flores, y a este conjunto se le denomina inflorescencia o glomérulo. Aquellas pocas yemas que no alcanzan a diferenciarse en flores, forman ramas secundarias o terciarias, cuando se dan condiciones ambientales poco favorables para la floración (Arcila, 2004).

1.1.6 Generalidades de la variedad Castillo®

La variedad Castillo es un cultivar compuesto, con uniformidad en sus características agronómicas; al igual que otras variedades cultivadas, la variedad Castillo es susceptible a plagas como el minador de la hoja y la broca del café. Con respecto a la roya del cafeto, una alta proporción de los materiales que han participado en su conformación, fue evaluada en el CIFIC utilizando la colección de razas patogénicas a los derivados de Caturra x Híbrido de Timor, que dicha institución posee; sólo un 2,5% de los materiales evaluados fueron catalogados dentro del grupo fisiológico “E”, que corresponde al genotipo SH5 (plantas obtenidas por autofecundación), de las variedades susceptibles Típica, Borbón y Caturra. El restante 97,5% fue clasificado dentro de los grupos de resistencia a la roya del cafeto. Sin embargo, la importancia de estas pruebas se ha reducido debido a la diversidad de razas de *H. vastatrix* compatibles con los derivados de ese origen que existen en las regiones productoras de Colombia (Moreno, 2004).

Con el método de evaluación de resistencia incompleta a la enfermedad desarrollado en Cenicafé, éste, ha permitido la evaluación exhaustiva de numeroso germoplasma para su utilización dentro de un nuevo esquema de producción de variedades poseedoras de esta resistencia, para lograr resistencia durable al patógeno dentro de una estrategia de diversidad genética se estableció que una proporción mayor del 80% de los genotipos que participaron en su proceso de obtención poseen, este tipo de resistencia que se hace visible cuando la resistencia completa es vulnerada por razas compatibles del patógeno (Alvarado, 2004). Con relación a la enfermedad de las cerezas del café (CBD), en el CIFIC se han realizado inoculaciones con aislamientos patogénicos de cuatro procedencias (Kenia, Malawi, Camerún y Zimbabwe). El resultado de las pruebas indica que más del 50% del material evaluado muestra reacciones de resistencia a uno o varios aislamientos simultáneamente (Farfan *et. al.* 2004). Este resultado, muy promisorio y novedoso para la caficultura de Colombia, es claro indicativo de la correcta

previsión tomada en el sentido de incorporar en una nueva variedad, la probable tolerancia a una enfermedad aún restringida al Continente Africano.

Los defectos del grano son similares a los de las variedades Caturra y Colombia, con una importante reducción entre el 7 y el 8% en la proporción de grano afectado, cuando se le compara con la variedad Colombia (Castillo y Moreno, 1987). El éxito de la selección por tamaño del grano es un resultado muy notable al lograr una variedad compuesta que posee una proporción de café supremo, superior a 80% en promedio; esta característica constituye una excelente respuesta institucional a la demanda por parte de los caficultores de producir variedades con mayor granulometría que les brinda ventajas comparativas en el mercado del grano.

En cuanto a su calidad, el café variedad Castillo®, mediante evaluaciones del panel de investigación de Cenicafe mediante la realización de numerosas pruebas doblemente ciegas, descriptivas, cuantitativas y sensoriales, sobre muestras de café pergamino seco de la variedad Castillo®, en comparación con los testigos comerciales Típica, Caturra, Borbón, y Colombia. De los resultados se destaca que, cuando las muestras se procesaron bajo similares y óptimas condiciones durante el beneficio, la torrefacción y la preparación de la bebida, la calidad de la variedad Castillo y la de las otras variedades cultivadas en el país, es muy homogénea. La bebida presenta cuerpo y amargor suave, aroma y acidez pronunciadas para grados medios de tostación. No se detectaron diferencias significativas en la calidad de la bebida (Moreno y Alvarado, 2000).

La variedad Castillo muestra buena adaptación en diversidad de ambientes, Su conformación genética es garantía de estabilidad en sus atributos agronómicos y de resistencia a roya, permite su siembra en las diferentes zonas donde la roya del cafeto es un factor limitante a la producción, como también en regiones donde la enfermedad no tiene mayor incidencia. En las regiones de mayor altitud, permite a los productores beneficiarse del mayor potencial productivo, de la excelente granulometría y de la ventaja por ahora intangible, de la tolerancia a la

enfermedad de las cerezas del café (Castaño, 2012).

Manejo agronómico. Requiere del uso adecuado y oportuno de las prácticas para el establecimiento y manejo de los cafetales recomendadas por Cenicafé, entre las cuales se encuentra la selección de material de siembra (colinos), densidades de siembra superiores a 5.000 tallos o plantas/ha. El correcto manejo agronómico le garantiza a los caficultores ventajas adicionales en productividad en las diferentes regiones, acordes con las características particulares de suelo y clima de las respectivas áreas geográficas (Cenicafe, 2013).

Calidad en taza. La bebida presenta cuerpo y amargor suave, y aroma y acidez pronunciadas para grados medios de tostación, cuando las muestras se procesaron bajo similares y óptimas condiciones durante el beneficio, la torrefacción y la preparación de la bebida. No se detectaron diferencias significativas en la calidad de la bebida (Cenicafe, 2013).

La variedad Castillo es un compuesto que permite su utilización exitosa en diversidad de zonas cafeteras alrededor de todo el país. Su conformación genética es garantía de estabilidad en sus atributos agronómicos y de resistencia a roya, permitiendo su siembra en las diferentes zonas cafeteras donde la roya es un factor limitante para la producción, como también en regiones donde la enfermedad no tiene mayor incidencia. En esas regiones de mayor altitud, como es el caso del departamento de Nariño, esta variedad les permite a los productores beneficiarse del mayor potencial productivo, de la excelente granulometría, y de la ventaja por ahora intangible de la tolerancia a la enfermedad de las cerezas del café (Cenicafe, 2013).

1.2 Efectos de la sombra sobre el cultivo de café

El cultivo del café a libre exposición solar es la práctica habitual en muchas partes del mundo y esto provoca la exposición de la hoja a niveles de alta irradiación y la absorción de mucha más energía de la que es utilizable por la fotosíntesis. Estas condiciones pueden provocar una sobrecarga de energía y un sobrecalentamiento de las hojas que, en casos extremos, puede

llegar a temperaturas de 40°C o incluso valores más altos (Maestri *et al.*, 2001), sobre todo si los estomas están cerrados, como ocurre en los días soleados en las plantaciones sin sombra (Butler, 1977). Sólo bajo estas condiciones extremas de irradiación se podrían observar efectos negativos de las altas temperaturas, como la clorosis de las hojas y el daño de las mismas (Cannell, 1985; Wrigley, 1988).

En este contexto, las prácticas culturales como el sombreado producido por especies arbóreas, han recibido un renovado interés en los últimos años. Algunos autores han evaluado el manejo de sombra en las plantaciones de café (Beer *et al.* 1998), así como la fisiología y la producción del café bajo estas condiciones (DaMatta, 2004a).

Las plantaciones recientes de café (variedad Caturra y Castillo), tienen una gran plasticidad en respuesta a diferentes niveles de irradiación. Estas nuevas variedades crecen bien sin sombra e incluso pueden mostrar producciones más altas que las obtenidas con árboles de sombra, sobre todo en zonas con clima y suelos adecuados (DaMatta, 2004).

El sombreado con árboles se ha adoptado para evitar reducciones en las temperaturas nocturnas que pueden provocar heladas en las partes altas, como en Kenia (Carr, 2001), o en latitudes más bajas, como en el estado de Paraná, sur de Brasil (Caramori *et al.* 2003).

La eficiencia del sombreado, como un medio para proteger la planta de café contra heladas, se debe a que la planta está más cerca del árbol que le está generando dicha condición (Caramori *et al.*, 1995). Para cafetales jóvenes, se necesita un sombreado temporal más denso, como se obtuvo con el uso de árboles como el guandúl (*Cajanus cajan*) el cual es muy eficaz contra las heladas. Trabajos realizados sobre cultivos sembrados bajo sombrero, hablan de resultados prometedores con el uso de otros métodos, como sombreado con especies arbóreas, que confieren una protección notable, ya que las temperaturas registradas en plantas pequeñas (5-6 par de hojas) en el campo fueron alrededor de 10°C más, que en las plantas sin

protección (Caramori *et al.* 2004).

Los efectos protectores de sombreado se han asociado con la entrada de la radiación inferior a nivel de la copa de café, lo que puede reducir el alcance de los daños foto-oxidativos, un fenómeno observado con frecuencia en el café sembrado a libre exposición en las zonas marginales (DaMatta, 2004a).

El sombreado temporal también ha sido adoptado en el sur de Brasil, para proteger las plantas jóvenes de café contra heladas, así como en sistemas con árboles de crecimiento rápido para incrementar la cobertura del suelo y maximizar la tasa de eficiencia de los nutrientes y utilización del agua durante la fase juvenil de la cosecha de café (Caramori *et al.* 1995).

Otros efectos del sombrero sobre la fisiología del café son las menores fluctuaciones de temperatura, aumento de la humedad relativa del aire, y los cambios en la rugosidad de la aerodinámica de la superficie cultivada. Tomadas en conjunto, estas alteraciones disminuirían el déficit de presión de vapor, que a su vez permite la apertura estomática (favoreciendo así la absorción de CO₂), sin un aumento proporcional en las tasas de transpiración. Por lo tanto, la pérdida de agua debida a la evapotranspiración del cultivo empieza a reducirse, debido al aumento de la cobertura del suelo y una disminución de la abundancia de malas hierbas (Maestri *et al.* 2001).

Steiman *et al.* (2007) estudiaron en Hawai la aplicación de caolín (una partícula que forma una película reflectante sobre la superficie de la hoja) como una estrategia de protección del dosel del café contra la temperatura excesiva y la radiación solar. Con aplicaciones quincenales de caolín durante 21 meses a cultivares Typica cultivados al aire libre, encontraron una disminución significativa del 10% en la temperatura de la hoja que fue acompañado por un aumento del 71% en la tasa de fotosíntesis neta paralela a una duplicación de la producción de cultivos de árboles tratados con caolín, en comparación con los individuos no tratados. El

rendimiento de los cultivos se asoció con un aumento de la reflectancia de la película de caolín a los entrenudos más sombreados en la parte interior del dosel, lo que provocaría un aumento de iniciación floral. Aunque los resultados son interesantes y con beneficios potenciales obvios, teniendo en cuenta el hecho de que los autores exploraron cultivares de baja productividad adaptados a la sombra, la investigación con cultivares de alto rendimiento es necesaria para determinar el potencial real de la utilización del caolín.

Si el número de nudos es el componente clave de la producción de café (Cannell, 1985), los rendimientos deberían disminuir con el aumento de sombreado, en particular en entornos óptimos o casi óptimos para el árbol de café, incluso si todos los otros factores de crecimiento son favorables (Da Matta, 2004a).

1.3 Comportamiento del cultivo de café bajo diferentes niveles de sombrero

El café es propenso a la fotoinhibición de la fotosíntesis cuando está a libre exposición, ya que por tratarse de una planta C3, este alcanza su punto de saturación con intensidades de luz relativamente bajas (Ramalho *et al.* 2003). Según Chaves *et al.* (2008) las limitaciones fotoinhibidoras causadas por la libre exposición solar, pueden pasar a un segundo plano en algunas variedades, por su nivel de adaptación a altas intensidades de irradiación solar.

Araujo *et al.* (2008) encontraron una baja flexibilidad fisiológica en condiciones de baja luminosidad, en cuanto a la adaptación del mismo, en hojas de café localizadas bajo sombrero, causando una reducción en dicha plasticidad la cual fue comparada con hojas a libre exposición solar. Los autores han propuesto que la limitación de fotosíntesis se da por la baja disponibilidad de luz; este factor es uno de los principales motivos para las bajas producciones del café cultivado en sistemas asociados con árboles, en contraste con la alta producción de café en áreas productoras a libre exposición del sudeste de Brasil (DaMatta *et al.* 2007).

De igual manera, DaMatta *et al.* (2007) han confirmado que, en condiciones edafoclimáticas óptimas o en condiciones de poco sombrero, se generan ventajas indirectas en época de cosecha. Además, los agroecosistemas con sombríos moderados tienen otras ventajas como impactos positivos financieros por los ingresos suplementarios de árboles asociados (frutales) y la conservación de recursos naturales y diversidad biológica (Vaast *et al.*, 2007). Sin embargo, Araujo *et al.*, (2008), quienes evaluaron plantaciones de café bajo diferentes niveles de sombrero, no encontraron diferencias productivas entre los diferentes niveles de la luz alcanzados con la implementación de sombríos y aquellos con libre exposición solar.

Los diferentes niveles de radiación se relacionan con la regulación de azúcares en la producción, como lo mencionan Franck *et al.* (2006) quienes observaron que esta baja regulación era más severa en horas de la tarde y la relacionaron con un aumento de azúcares solubles en las hojas, debido a un incremento rápido de la demanda durante horas de mañana. Recientemente, DaMatta (2008) demostraron que las bajas regulaciones en las hojas de café son motivadas por una reducción de los azúcares, proceso independiente del metabolismo de carbono.

El empleo de diferentes intensidades de luz permitió cuantificar los efectos de las limitaciones por conductancia estomática y la disponibilidad fotosintética de la hoja de café bajo diferentes niveles de sombra, mostrando que niveles de irradiación del 45% no limitan la fotosíntesis de hojas de café (Frank *et al.*, 2006).

De igual manera, Genty y Harbinson (1996) afirman que en un flujo óptimo de luz fotosintéticamente asimilable y condiciones de baja fotorespiración, la eficiencia de la tasa de fotosíntesis neta aumenta; en cambio, si se exceden los niveles de radiación fotosintéticamente activa (RFA), generan reducciones en la eficiencia fotoquímica y en el crecimiento de la plantas, llegando en algunos casos a generar el fenómeno de foto-inhibición.

Vaast *et. al.*, (2002) observaron que las hojas de café alcanzaron su conductancia estomática más alta en las horas de mañana y disminuyeron a partir de entonces debido a las variaciones de temperatura generadas por el ambiente; por esta razón, los estomas de la hoja de café expuesto plenamente a la luz, presentan niveles de conductancia inferiores a los observados en hojas de cafeto de sistemas bajo sombra, independientemente del período (lluvioso o seco).

De otra parte, los valores de conductancia estomática del café bajo sombra de árboles pueden ser relacionados con un cierre estomatal retrasado, debido a que la sombra protege a la planta de condiciones microclimáticas desfavorables. De todos modos, la transpiración no alcanza los niveles críticos, debido a que las hojas no se comportan uniformemente, ya que el sistema de cultivo de café puede ser subdividido en numerosos microentornos de acuerdo a las diferentes cantidades de luz y temperatura que recibe cada uno de ellos (Dauzat *et al.*, 2001).

De tal manera, la transpiración de plantas de café cultivadas bajo plena exposición solar, fue limitada por condiciones adversas climáticas (la alta temperatura y evapotranspiración) y esto se ve reflejado por el pobre crecimiento y la baja productividad de plantas de café cultivadas bajo estas condiciones (Van Kanten, 2003).

Vaast *et. al.*, (2007) en su trabajo para determinar la evapotranspiración en plantas con sombrío y plantas a libre exposición solar concluyen que durante la estación lluviosa, la transpiración de café se mantuvo en niveles bajos y por consiguiente las tarifas de transpiración eran inferiores bajo árboles de sombra, sobre todo bajo la sombra densa; durante la estación seca, la transpiración de café se disminuyó de manera evidente, (en las plantaciones bajo sombrío en comparación con plantíos sembrados a libre exposición solar, respectivamente), puesto que en ambientes secos y luminosos aumenta la apertura estomática liberando agua en forma de vapor lo que causa una deshidratación. Encontraron además que dichas condiciones climáticas no eran óptimas para el crecimiento de café debido a una temperatura del aire de 26°C, grandes

variaciones de radiación y evapotranspiración en el día, sobre todo durante el período donde la disponibilidad de agua de suelo era más baja.

La interceptación del agua por el follaje de los árboles afecta la disponibilidad de agua en el suelo, fenómenos conocidos como “sombra seca” (Valladares *et al.* 2005). Este fenómeno es contradictorio en algunos ambientes, como el café creciendo bajo árboles de sombra, debido al concepto tradicional de creer que los ambientes más sombreados para el café son los más favorables, desde el punto de vista de la productividad y la biodiversidad. Esta condición fue observada por Jaramillo (2005) en estudios sobre redistribución de la lluvia en sistemas agroforestales con café, en el cual encontró menor disponibilidad hídrica en áreas cultivadas con café y sombrío de *Cordia alliodora* (nogal cafetero) comparado con el café a libre exposición solar, como efecto del alto grado de sombra (mayor al 45%) dado por los árboles de sombrío, puesto que se demostró que el desarrollo radical de *C. alliodora*, estaba en los primeros 50 centímetros del suelo, lo que generaba una competencia directa del recurso hídrico con las plantas de café sembradas bajo este sistema.

En los sistemas agroforestales con más de una especie, se presenta la competencia por los recursos como la humedad del suelo, los nutrientes y la radiación solar. Cuando los rayos solares atraviesan las copas de los árboles, la cantidad de radiación para los estratos más bajos es menor y su calidad es alterada, debido a que las hojas preferentemente absorben la luz roja y la azul dentro del rango espectral de la radiación fotosintéticamente activa (RFA); la intensidad de sombreado en los sistemas agroforestales varía de acuerdo con la especie, la densidad de siembra, la edad, la altura, el espaciamiento y la estructura de las copas del componente arbóreo (Peri, 1999).

La competencia interespecífica y la interceptación de la lluvia por parte del dosel de los árboles, en épocas secas, son las explicaciones del mayor estrés hídrico a la sombra que al sol

durante estos períodos. A este fenómeno también se le ha llamado “paradoja edáfica”, Valladares *et al.* (2005). Farfán y Jaramillo (2008), al comparar la disponibilidad de agua en suelo durante el período enero de 1998 a diciembre de 2000, encontraron que en Pueblo Bello (Cesar), se presentaron deficiencias hídricas en el suelo cuando se cultivó simultáneamente café bajo sombrío de *Erythrina fusca* y se dejó el suelo con cobertura vegetal muerta.

Carr (2001) concluye que una temperatura alta de las hojas ($> 26^{\circ}\text{C}$) junto con condiciones de aire seco (déficit de vapor de saturación de aire $> 1.5\text{kPa}$), pero sembradas bajo sombrío, conducen a una disminución de transpiración en las plantas de café, debido a una reducción de la conductancia estomatal, mientras que plantaciones sembradas bajo libre exposición solar con las condiciones climáticas anteriormente mencionadas, generan un aumento excesivo de la transpiración en las plantas de café.

1.4 Efecto de la luz sobre algunas características de las hojas

Entre los diversos caracteres de los estomas, la densidad estomática (SD) es un parámetro eco-fisiológico importante, que afecta el intercambio de gases y la intensidad fotosintética (Woodward, 1987). Tanto la densidad de estomas como el índice general de la actividad estomatal disminuyen con la disminución de la intensidad de luz (Pallardy y Kozlowski, 1979).

La luz es un factor primordial que afecta tanto al crecimiento como la distribución de tejidos de la planta (Fahn, 1990). La aclimatación y la irradiancia fotosintética implican una variedad de respuestas, incluyendo cambios de carácter anatómico, morfológico, bioquímico y características fotosintéticas en las hojas. Existe una estrecha relación entre las características de las hojas y la radiación interceptada por las mismas. Por lo tanto, la distribución de la radiación, se puede utilizar para predecir la variación espacial de la hoja (Pandey *et al.*, 2003). En general, las plantas se desarrollan bajo 'sol' o 'sombra' y pueden aclimatarse a diferentes niveles de irradiación. Las diferencias anatómicas y fisiológicas entre las hojas de cultivos bajo sol y hojas

de cultivos bajo sombra se han estudiado ampliamente. Anatómicamente, las hojas bajo libre exposición solar tienen un tejido en empalizada más desarrollado y una superficie del mesófilo mayor por unidad de área foliar (SLA); además, son más gruesas que las hojas que crecen bajo sombra (Fahn, 1990).

En el cultivo del café, las diferencias fenológicas deben ser tenidas en cuenta al momento de sembrar una especie de árbol de sombra para el asocio con café; factores como: la especie de árbol de sombra, la densidad de siembra, la frecuencia de poda de la plantación asociada, contribuyen positivamente en el mejoramiento del efecto de sombrío sobre el cultivo; Estas prácticas permiten asegurar que el nivel de sombra no sea demasiado alto y cause problemas con la productividad de café, asegurando por el contrario, que las plantas de café soporten condiciones climáticas adversas (Vaast *et. al.*, 2006)

El efecto de las condiciones de luz, de la densidad y del índice de estomas, es uno de los controles ambientales más intensamente estudiados en el desarrollo de estomas (Woodward, 1998; Woodward y Kelly, 1995).

De acuerdo con Vaast *et al.* (2006), el sombreado de las hojas da lugar a una reducción significativa en la densidad celular epidérmica. Se cree que el aumento de las densidades de células epidérmicas se debe a un aumento en la iniciación de la apertura estomática, durante las primeras etapas de crecimiento de las hojas.

1.5 Cultivo del café bajo sistemas forestales

En términos generales, la agroforestería es un sistema de manejo sostenible de los cultivos y del suelo, mediante el cual se busca combinar la producción de especies arbóreas con cultivos de valor económico, en una forma simultánea o secuencial en la misma unidad de terreno, con aplicación de prácticas de manejo compatibles con las prácticas culturales de la población local (Duran, 2004).

La importancia relativa y el efecto de las diferentes interacciones entre los árboles de sombra y el café depende 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 los cultivos, así como de las prácticas de manejo del cultivo principal (Beer *et al.* 1998). Estas interacciones pueden afectar positiva o negativamente la producción del café (Herrera *et al.* 1995).

Los árboles de sombrero en los cafetales permiten ejercer un control sobre la economía del agua que mitiga los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción; también contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, ayudan a reducir la erosión, reciclan nutrientes y aportan gran cantidad de materia orgánica (Beer *et al.* 1998). Además, incrementan las poblaciones de plantas epifitas y aumentan la diversidad de las especies de aves, entre otros (Kiara y Naged, 1995).

Es tradicional la discusión acerca de si el sombrero favorece o no a las plantaciones de café en las diferentes regiones productoras del mundo. El potencial de producción, la competencia por el agua y los nutrientes, y la incidencia de plagas y enfermedades, son los aspectos más importantes a considerar (Beer *et al.* 1998).

De acuerdo con Farfán *et al.*, (2012), se debe tener un plan de acción dirigido a mantener una estrategia de adaptación y mitigación de los efectos ocasionados por las variaciones climáticas, con el objetivo prioritario de garantizar la sostenibilidad de la caficultura. Parte de ese plan incluye la activación de alertas tempranas y la modelación de escenarios posibles, con el fin de identificar cuáles son las mejores condiciones para que el café pueda desarrollarse, en la medida en que cambie la temperatura del planeta.

En sistemas de monocultivo, el cultivo del café requiere de mayores esfuerzos por parte del productor, ya que el café a plena exposición requiere gran cantidad de insumos para maximizar los rendimientos, (Beer *et al.* 1998).

En los sistemas agroforestales se mejora la conservación de los recursos naturales y se requiere menor aplicación de insumos, lo que se traduce en menores costos de producción. Además, la explotación de los productos adicionales de los árboles utilizados para el sombrero (frutos, madera o leña para producción de carbón vegetal) genera ingresos adicionales para el agricultor, lo cual ha estimulado recientemente el interés sobre el uso de árboles para sombra (DaMatta y Ramalho, 2006).

DaMatta y Ramalho, (2006) determinaron que los factores claves para decidir sobre el empleo o no de árboles en el café, se dividen en cinco grupos: características ambientales y de suelo; nivel y calidad de los insumos disponibles para mejorar las condiciones en el café; los objetivos de la producción; control de la erosión y fijación de CO₂.

La producción de café a plena exposición solar o bajo sombra, ha sido objeto de discusión desde el siglo anterior (Beer *et al.* 1998). Gutiérrez (2003) menciona que, para las condiciones de Costa Rica, el cultivo al sol, en comparación con sombra balanceada, produjo apenas un 10% más de cosecha por hectárea; a pleno sol se aumentó la presencia de *Cercospora coffeicola* y de arvenses, aumentando ostensiblemente los costos de producción. En los agro ecosistemas cafeteros, el suelo es uno de los componentes fundamentales y entre sus propiedades químicas, el contenido de materia orgánica es de primordial importancia; las plantaciones a pleno sol acumulan, en términos generales, menos hojarasca que aquellas establecidas bajo sombra regulada, lo que hace que el suelo en las primeras etapas sea más susceptible a la erosión y al crecimiento de arvenses (Fournier, 1988).

Las condiciones que se generan en un SAF de café dependerán, en gran medida, de las especies arbóreas asociadas y del manejo; en este sentido, Gutiérrez (2003), encontró para la zona sub-óptima de Pérez Zeledón, Costa Rica, menor humedad en suelos de cafetales (convencionales) bajo sombra de *Terminalia ivorensis*, que en los establecidos bajo sombra de

Eucalyptus deglupta; en ambos casos se observó una disminución en la temperatura foliar de entre 2 y 4°C, encontrando también que la conductividad estomática y la asimilación neta fueron mayores en plantaciones asociadas a *E. deglupta*, que aquellas bajo *T. ivorensis*.

Calabria y Puntieri (2008) mencionan que la mala calidad de café en Brasil se debe a que su cultivo se desarrolla a pleno sol. Muschler y Nair (2001) evaluaron los efectos de sombra con especies forestales, sobre la calidad de café en Turrialba, encontrando mejores propiedades organolépticas, mayor peso fresco en frutos y mayores proporciones de café pergamino seco en plantaciones bajo sombra abierta (40 a 60% de sombra) y/o sombra densa (> 80% de sombra), que en aquellos cosechados en plantaciones a pleno sol o en asocio con poró (*Erythrina berteroan*) podado tres veces por año.

El sombreado como una práctica cultural habitual en muchas regiones productoras fue paulatinamente abandonado, debido a las disminuciones en la productividad, incluso en países como Colombia, donde el café se siembra predominantemente bajo sombra; actualmente, dos tercios de la cosecha colombiana se han convertido a exposición completa (DaMatta *et al.*, 2007). En Brasil, el sistema de cultivo bajo sombra ha sido remplazado casi completamente desde la década de 1950 debido a la baja producción de la cosecha de las plantaciones con sombra, probablemente por una competencia excesiva de agua entre las especies de árboles y café, así como por el sombreado excesivo (DaMatta y Rena, 2002).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización

El presente trabajo se realizó en la vereda Santa Ana del corregimiento de Matituy localizada a 1950m.s.n.m.; su suelo tiene un contenido medio de materia orgánica (5,35%), es ácido (pH=5,57), bajo contenido de fósforo (7,07ppm) y con un contenido alto de potasio (0,55 cmolcarga kg⁻¹).

2.2 Variedad a sembrar

Se sembró la variedad Castillo® el Tambo; que se caracteriza por ser un cultivar con resistencia a plagas y enfermedades; al igual que otras variedades cultivadas en Colombia, la variedad Castillo es susceptible a plagas como el minador de la hoja y la broca del café (Castaño, 2012).

2.3 Sistema de siembra

Preparación del terreno y siembra de las plantas de café: se realizó la aplicación de glifosato en dosis de 2 lt/ha, después de 10 días de realizada esta aplicación se procedió a la realización de surcos a manera de trazado del lote con la ayuda de un azadón y fibra para determinar la delimitación de los surcos y de los tratamientos, en los lugares donde se realizó el trazado se realizaron huecos de 30 cm largo ancho y profundo, lugar en donde se realizará la siembra definitiva en campo.

Las plantas se sembraron en el lote experimental (en un suelo con una pendiente del 15%) a 1,3 m entre plantas y 1,3 m entre surcos, mediante un sistema en cuadro, teniendo en cuenta que los surcos de café queden orientados en una dirección de oriente a occidente; los huecos para la siembra se hicieron con una dimensión de 30x30x30cm (alto, ancho y profundo). El lote venía de estar en barbecho por lo cual se tomó un análisis de suelos inicial para programar la fertilización; todas las plantas al momento del trasplante provenían de almacigo (tres meses), todas se

encontraban bajo la misma intensidad luminosa y fueron aclimatándose, reduciendo el porcentaje de sombrero hasta ser llevadas a campo.

Un mes antes de la siembra se realizó una aplicación de cal dolomita, y 15 días después de la siembra se realizó la primera fertilización con relación el porcentaje de sombrero, el número de plantas por hectárea, para este ensayo se planifico hacer tres aplicaciones durante el año del cultivo a evaluar, así:

Tabla 1.

Dosis de fertilizante en kg/ha/año según el tratamiento que corresponda.

Fertilizante/Tratamiento	T1(0% sombra)	T2 (35% de sombra)	T3 (50% de sombra)	T4 (65% de sombra)
Nitrógeno	100	95	85	75
Potasio	87	83	73	65
Fosforo	17	14	13	13

2.4 Manejo agronómico del cultivo

Fertilización y manejo sanitario: La fertilización por su parte se llevó a cabo de acuerdo al análisis de suelos y a los manuales de fertilización de Castaño, 2012, en donde se tiene que tener en cuenta no solo el análisis de suelos si no también, el porcentaje de sombrero y la densidad de árboles por hectárea en donde todos los tratamientos al ser sembrados a 1,30x1,30m, poseían la misma densidad (tabla 1).

El manejo sanitario para plagas y enfermedades se realizó de manera preventiva, para el caso de defoliadores (*Comsus sp.*), que se pudiesen presentar se realizó una aplicación de clorpirifos al momento de la siembra y de cipermetrina en forma foliar 20 días después de la

siembra en dosis de 20cm por bomba de 20 litros. Se realizó además aplicaciones periódicas con ciproconazole (Alto 100®) para el manejo de problemas fungosos como mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*), la aplicación de estos se hace en dosis de 20 cm por bomba de 20 litros.

Riego: se aplicó riego, por método de aspersión solo en la época de siembra, mes de abril a mayo del 2014, para evitar el déficit hídrico se realizó riegos tres veces por semana, esta labor se llevó a cabo mediante riegos por aspersión foliar, especialmente en la época de verano donde predomina la sequía.

Plateos: se realizaron plateos, o limpieza de los árboles de café, cada dos meses, de manera mecánica rastrillo y pala, para evitar que la acumulación de malezas.

Control de malezas: Actividad que se realizó en forma manual con machetes, complementando con un control químico a base de Glifosato en dosis de 1 lt/ha.

2.5 Diseño experimental

El estudio se sembró bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos corresponden a los diferentes niveles de sombra:

Tabla 2.

Relación de tratamientos y su correspondiente porcentaje de sombrero.

TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE SOMBRA
T1 = TESTIGO	CULTIVO A LIBRE EXPOSICION.
T2	35% DE SOMBRIO.
T3	50% DE SOMBRIO.
T4	65% DE SOMBRIO.

La unidad experimental estuvo conformada por 99 plantas, distribuidas en 9 surcos con 11 plantas cada uno, para un área de 167,3 m², Cada tratamiento constó de tres (3) repeticiones, para un área experimental total de 2007 m² y 1188 plantas de café, equivalente a una densidad de 5917 plantas ha⁻¹.

2.6 Variables evaluadas

2.6.1 Variables ambientales

2.6.2 Humedad y temperatura del suelo.

Se evaluó la humedad del suelo como la cantidad de agua por volumen de suelo; mediante un termo hidrómetro de profundidades LCD DIGITAL 2,8 EX modelo KTC-908, NEWEST INDOOR/OUTDOOR THERMOMETER-HUMIDITY marca ZEN, para suelos, una vez por semana a las 7 am, 1pm y a las 5 pm, se realizaron tres mediciones por unidad experimental. Con el mismo instrumento y metodología se evaluó la temperatura diaria del suelo en °C, a 20cm de profundidad.

2.6.3 Temperatura ambiental

Se realizaron lecturas diurnas, máximas y mínimas, en la mañana (8 am), a medio día (1pm) y en la tarde (5 pm), para determinar la dinámica de la temperatura durante el día con un termo hidrómetro CLOCK–HUMIDITY-TEMPERATURE de la marca DIGITAL SERIES®

2.6.4 Humedad relativa

Con un higrómetro se realizaron tres lecturas diarias, en la mañana (8 am), a medio día (1pm) y en la tarde (5 pm) con un termo hidrómetro CLOCK –HUMIDITY-TEMPERATURE de la marca DIGITAL SERIES®.

2.6.5 Radiación Fotosintéticamente Activa

Se tomaron los datos con un luxómetro LIGHT METER WIDE RANGE EASYVIEW® marca EXTECH INSTRUMENTS modelo EA90, tres veces diarias (a las 8am, a la 1pm y a las

5pm), tres lecturas por unidad experimental, a un metro sobre el nivel del suelo y se convirtieron estas unidades de radiación fotosintéticamente activa (RFA), multiplicando el valor obtenido en lux por 10 y dividiéndolo por 0,54 encontrando el dato en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ (radiación fotosintéticamente activa), para determinar el flujo lumínico en cada uno de los tratamientos con sombrío y a los que están a libre exposición solar, realizando la medición en el menor tiempo posible para evitar que la nubosidad influya en las lecturas correspondientes.

2.6.6 Variables de crecimiento.

Las evaluaciones de índices fisiológicos se hicieron cada dos meses sobre plantas tomadas al azar, extrayendo una planta completa de cada unidad experimental, durante el tiempo que duró el ensayo, para un total de 144 plantas extraídas; en cada evaluación las plantas se llevaron al laboratorio de fisiología vegetal y en una estufa de secado se dejaron a una temperatura de 75°C, hasta que su peso sea constante y se determinó materia seca. Las plantas se dividieron en raíz, tallo y hojas de las cuales se tomó peso fresco y peso seco, utilizando una balanza analítica.

2.6.6.1 Área foliar.

Es el área de hojas que tiene la planta evaluada. Para su determinación se seleccionó en un cultivo de café variedad Castillo ®, un total de 100 hojas de diferentes estratos; se tomarán fotografías de cada una de ellas y mediciones reales del ancho y el largo; el área de cada una de las hojas seleccionadas se determinó con el software IMAGEJ. Con los datos mencionados y el área correspondiente a cada medición, se evaluaron diferentes modelos de área foliar en función del largo y/o el ancho para seleccionar el de mejor ajuste que se utilizó en las evaluaciones mensuales de esta variable, durante el periodo investigativo.

Una vez se ingresaron los datos de largo y ancho, el modelo que más se ajustó, con un R^2 de 0.94, fue el de regresión simple de la forma (1):

$$1. y = a + bx \text{ en donde:}$$

a= constante (-30,10)

b= 15,007.

X= ancho de la hoja.

Con este modelo se realizaron las diferentes medidas en cada una de las evoluciones correspondientes midiendo el ancho de las hojas en cada tercio, calculando así el área promedio y multiplicando por el número total de hojas que presenta la planta, las cuales se contaron de manera manual, para determinar el área foliar de la planta.

2.6.6.2 Índice de área foliar.

El IAF es la relación entre el área foliar de la planta y el área de suelo ocupada por la misma (2):

$$2. IAF = AF/AS.$$

Dónde:

IAF: índice de área foliar.

AF: área foliar.

AS: área del suelo ocupada por la planta.

2.6.6.3 Intensidad de asimilación neta.

La eficiencia fisiológica en el uso de la radiación se midió a través del índice de asimilación neta (IAN) que es la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar en un tiempo determinado (3) (Fageria, *et al.*, 2006; Hunt, *et al.*, 2002).

$$3. \text{IAN (g * cm}^{-2}\text{/ tiempo)} = (w_2 - w_1) (\ln Af_2 - \ln Af_1) / (T_2 - T_1) (AF_2 - AF_1)$$

Dónde: ln = logaritmo natural, Af1, Af2 = área foliar al inicio y final del intervalo de tiempo, w1, w2 = peso seco al inicio y final del intervalo de tiempo.

2.6.6.4 Índice de crecimiento relativo.

(RGR, siglas del inglés “relative growth rate”) es la medida principal del análisis de crecimiento y se define como la ganancia de biomasa por unidad de biomasa y tiempo (4) (Fageria, *et al.*, 2006).

Se calcula con base a la siguiente ecuación:

$$4. \text{ICR (g/ g*día)} = \ln W_2 - \ln W_1 / (T_2 - T_1)$$

Dónde: ln = logaritmo natural, W2= peso final del intervalo de tiempo, W1= peso inicial del intervalo de tiempo y T2 y T1 hace referencia al intervalo de tiempo para este caso, dos meses (por tratarse de medidas destructivas).

2.6.6.5 Índice de crecimiento del cultivo (icc).

También conocida como tasa de crecimiento del cultivo, indica el crecimiento por unidad de área en el suelo y por unidad de tiempo; se calcula con la siguiente ecuación (5) (Fageria *et al.*, 2006).

$$5. \text{ICC (g* día}^{-1}\text{ * m}^{-2}\text{)} = (W_2 - W_1 / T_2 - T_1) * (1/ AS)$$

Donde: W₂= peso final del periodo evaluado, W₁ = peso al inicio del periodo evaluado, T₂ = tiempo final, T₁ = tiempo inicial y AS= area del suelo.

2.6.6.6 Altura de la planta (AP).

Para esta medida se utilizó una cinta métrica, tomándola desde la base de la planta hasta la

base del pecíolo de la última hoja emitida en la zona apical. Siempre sobre las mismas, dos (2) plantas por unidad experimental, una lectura cada mes, en plantas marcadas dentro de cada uno de los tratamientos del lote, las mediciones se realizaron con una regla que tenía unidades en decímetros.

2.6.6.7 Biomasa seca.

Esta variable se evaluó mensualmente, se determinó la biomasa seca de raíces, tallos, hojas y biomasa total, con una balanza analítica; el secado se realizó en un horno, a una temperatura de 75°C, hasta que el peso sea constante lo cual significaba que había evaporado toda el agua que contenía el material vegetal.

2.6.6.8 Longitud de ramas.

En dos (2) plantas por unidad experimental se midió la longitud de ramas desde la base al ápice con cinta métrica, por estratos: 1/3 bajo, 1/3 medio y 1/3 alto; la medición se realizó mensualmente durante un año en plantas marcadas desde el inicio del estudio.

2.6.6.9 Número de nudos por rama.

En las mismas plantas de la evaluación anterior, mensualmente se contaron los nudos de dos (2) ramas de cada tercio, durante un año.

2.6.7 Análisis estadístico.

La evaluación de las diferentes variables se realizó con base en un análisis de varianza correspondiente al modelo de BCA (Bloques completos al azar) cuyo modelo es (7):

$$7. Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + E_{ij}$$

Siendo:

Y_{ij} : variable de respuesta observada o medida en el i-esimo tratamiento y el j-esimo

bloque.

μ = medida general de la variable de respuesta.

t'_i = efecto del i-esimo tratamiento.

β_j = efecto del j-esimo bloque.

E_{ij} = error asociado a la ij-esima unidad experimental.

En las variables con diferencias estadísticas entre tratamientos, se realizaron pruebas de comparación de promedios de Tukey al 95% de confiabilidad. El comportamiento de crecimiento se analizó con base en un análisis de tendencia en función de la variable tiempo, realizado con el programa Microsoft Excel y seleccionando el modelo con base en el mayor R^2 .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Dinámica de las Variables Ambientales.

3.1.1 Humedad del suelo y Temperatura del suelo

La figura 1a y 1b muestra el comportamiento de la humedad y temperatura del suelo, en los diferentes tratamientos evaluados durante un año de cultivo de café *Coffea arabica* variedad Castillo®. Se puede observar que la humedad del suelo no varió considerablemente de un tratamiento a otro, independientemente de las horas donde se tomó la medición correspondiente.

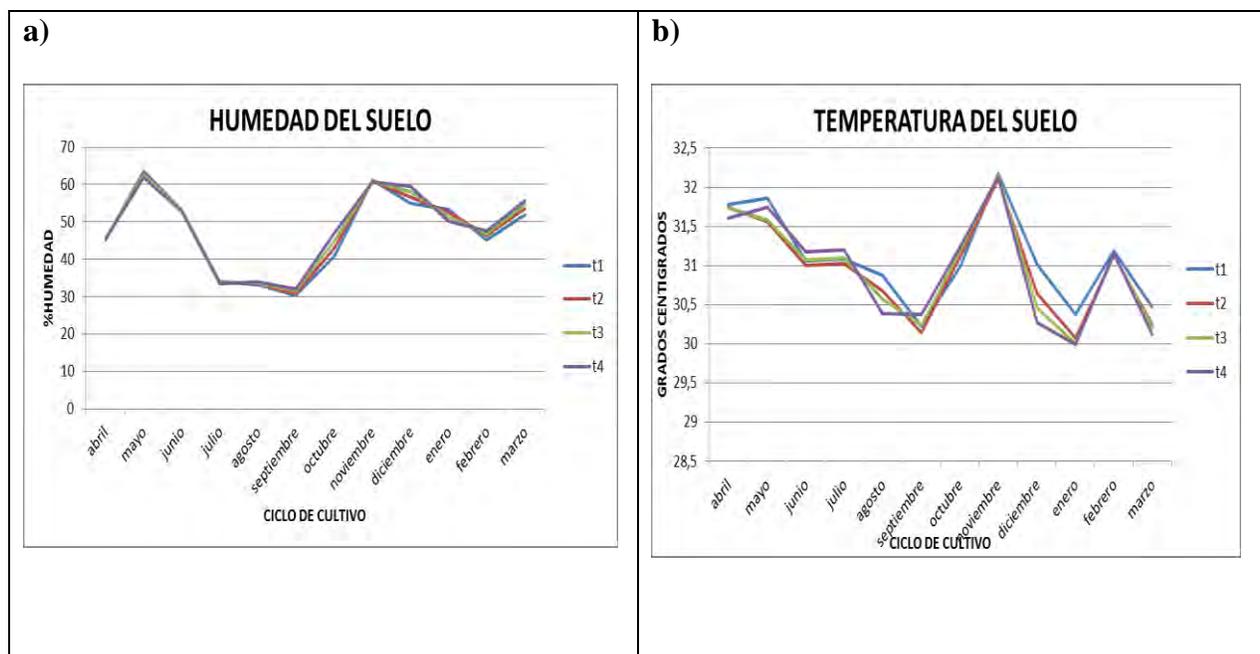


Figura 1. Comportamiento de la variable humedad del suelo (promedio mensual) en los cuatro tratamientos; b) Comportamiento de la variable temperatura del suelo (promedio mensual) en los cuatro tratamientos en el ciclo del cultivo evaluado.

Fuente este estudio

Respecto a este indicador, Beer *et. al* (1998), mencionan que el uso de sombra se recomienda en sitios con limitaciones en las propiedades de los suelos, por ejemplo baja retención de humedad o cuando la precipitación es insuficiente o está mal distribuida, lo cual genera períodos secos. También, cuando los suelos y la oferta hídrica son apropiados, pero el

cultivo se halla en zonas demasiado altas o bajas, el uso del sombrío evita daños por la exposición a libre radiación, lo que conlleva aumento de temperaturas, y un efecto acelerado en la evapotranspiración.

Los resultados obtenidos en este estudio difieren de los estudios de Poveda y Jaramillo (2005) y Poveda *et al.* (2001), que demuestran que bajo una cobertura vegetal de café a la sombra, ocurren consecuencias importantes con respecto a las condiciones de disponibilidad de agua que propicia la presencia del bioma circundante y de los flujos superficiales hacia la atmósfera, posiblemente porque el árbol de sombrío genera condiciones de humedad y las polisombras por ser inertes, son incapaces de generar.

Como se observa en la figura 1 (b), la temperatura del suelo en las mediciones de 8 am, 1 pm, respectivamente, no muestra cambios en esta variable, en los diferentes tratamientos, aunque en el tratamiento a libre exposición solar (T1), la temperatura del suelo presenta un comportamiento un mayor, aunque leve, frente a los demás tratamientos.

En comparación a este estudio, y basados en los leves aumentos de temperatura del suelo que presenta el tratamiento bajo libre exposición solar (T1), Cardona y Sadeghian (2005), encontraron diferencias de temperatura del suelo cuando trabajaron con cultivos de café con sistemas de sombrío con guamo (*Inga sp.*) y determinaron que los suelos de cafetales a libre exposición presentaron la mayor temperatura y no se observaron variaciones relevantes a través del perfil, los menores valores de esta variable en cafetales con sombrío de guamo se atribuyen según Roa *et al.* (1999), a la menor radiación solar y velocidad del viento, sumados al aumento de la humedad en el ambiente, que produce el sombrío; estos fenómenos hacen que se disminuya la demanda de agua de los cultivos y la evaporación del suelo, por lo tanto los tratamientos sembrados bajo diferentes niveles de sombra presentaban una tendencia más baja en comparación al testigo.

3.1.2 Temperatura Ambiental.

En cuanto a la temperatura ambiental registrada en los diferentes tratamientos tanto en las horas del día como en la noche no se observaron diferencias en el comportamiento de esta variable durante el periodo evaluado (Figura 2a, 2b, 2c y 2d).

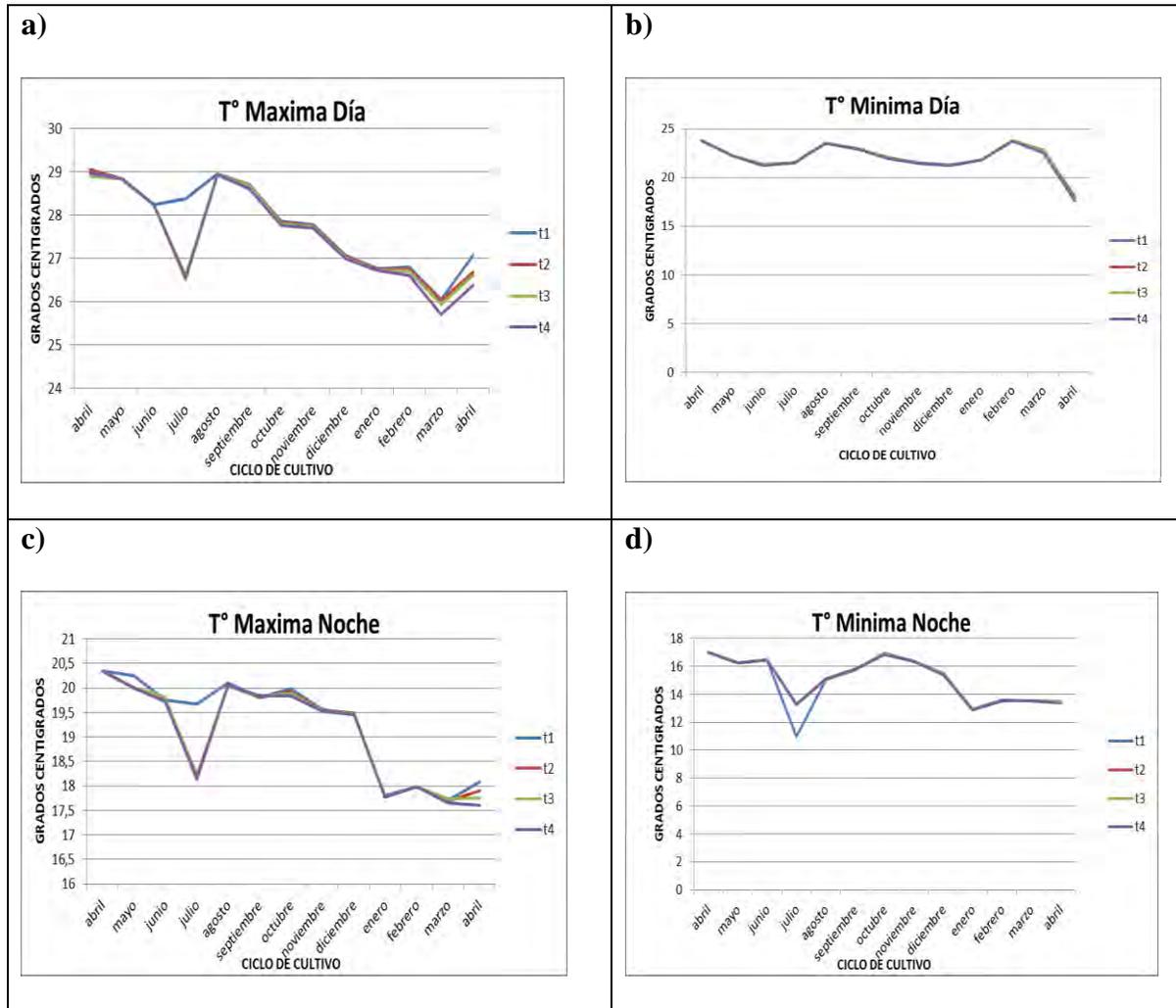


Figura 2. a) Comportamiento de la variable temperatura máxima en el día para los tratamientos evaluados; b) Comportamiento de la variable temperatura mínima en el día para los tratamientos evaluados. c) Comportamiento de la variable temperatura máxima en la noche para los tratamientos evaluados; d) Comportamiento de la variable temperatura mínima en la noche para los tratamientos evaluados.

El comportamiento de la temperatura es comparable con los resultados del estudio realizado por Rao *et al.* (1997), quien después de varias evaluaciones determinó que los cafetales a libre exposición presentaron la mayor temperatura y no se observaron variaciones relevantes a través del perfil de la planta. Los menores valores de esta variable en cafetales con sombrero de guamo se atribuyen a la menor radiación solar y velocidad del viento.

3.1.3 Humedad Relativa.

En la figura 3, se puede observar el comportamiento de la humedad relativa en cada uno de los tratamientos sembrados bajo sombrero T2, T3 y T4 (35, 50 y 65% de sombra), los cuales presentaron valores más altos, en relación al cultivo sembrado a libre exposición. En el tratamiento a libre exposición se ilustran menores valores en la humedad relativa, durante todo el periodo experimental.

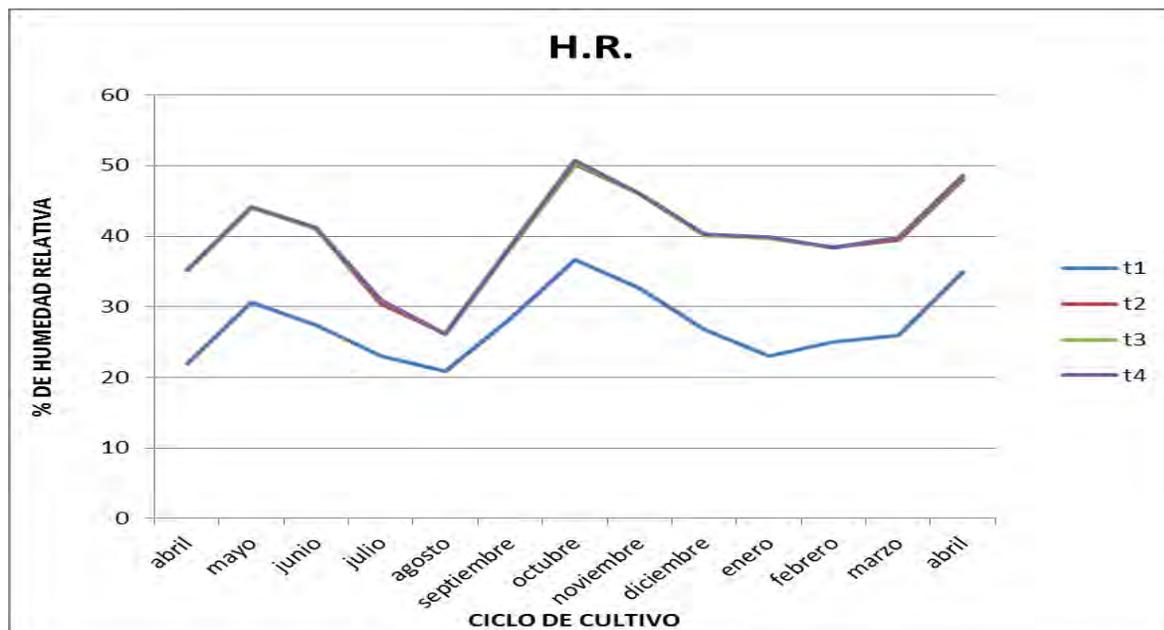


Figura 3. Comportamiento de la variable humedad relativa promedio, en los cuatro tratamientos, en el ciclo del cultivo evaluado.

Fuente este estudio

En relación a lo anterior, Jaramillo (2005) determina que la cantidad de radiación solar, el agua disponible en el suelo, y la Humedad relativa del ambiente son factores que interactúan, particularmente en ambientes secos, por lo tanto, las respuestas de las plantas a la luz o a la sombra están muy afectadas por la disponibilidad hídrica y la Humedad relativa lo que se relaciona con los datos obtenidos en esta variable en donde los tratamientos sembrado bajo sombrío presentan una porcentaje de humedad relativa que fluctúa entre 35 y 50%, mientras que el tratamiento sembrado bajo libre exposición (T1), no supera el 35% de humedad relativa durante todo el ciclo de cultivo evaluado.

3.1.4 Radiación fotosintéticamente activa (RFA).

Al determinar el comportamiento de la variable luminosidad, medida como radiación fotosintéticamente activa (RFA), en los diferentes tratamientos, se pudo establecer que el comportamiento de esta variable en el tratamiento sembrado a libre exposición solar (T1), presenta los valores más altos a lo largo del ciclo del cultivo, (figuras 4a, b y c); cabe resaltar que el comportamiento de los tratamientos sembrados bajo un sistema de sombrío (T2, T3 y T4) presentaron disminución en la radiación fotosintéticamente activa (RFA), siguiendo un comportamiento directamente proporcional al porcentaje de sombrío, que dejaba infiltrar cada polisombra, teniendo valores de radiación fotosintéticamente (RFA) más altos el tratamiento testigo T1 (libre exposición solar) seguido por el tratamiento T2 (35% de sombra), T3 (50% de sombra) y T4 (65% de sombra), para todos los horarios evaluados (8 a.m., 1 y 5 p.m.).

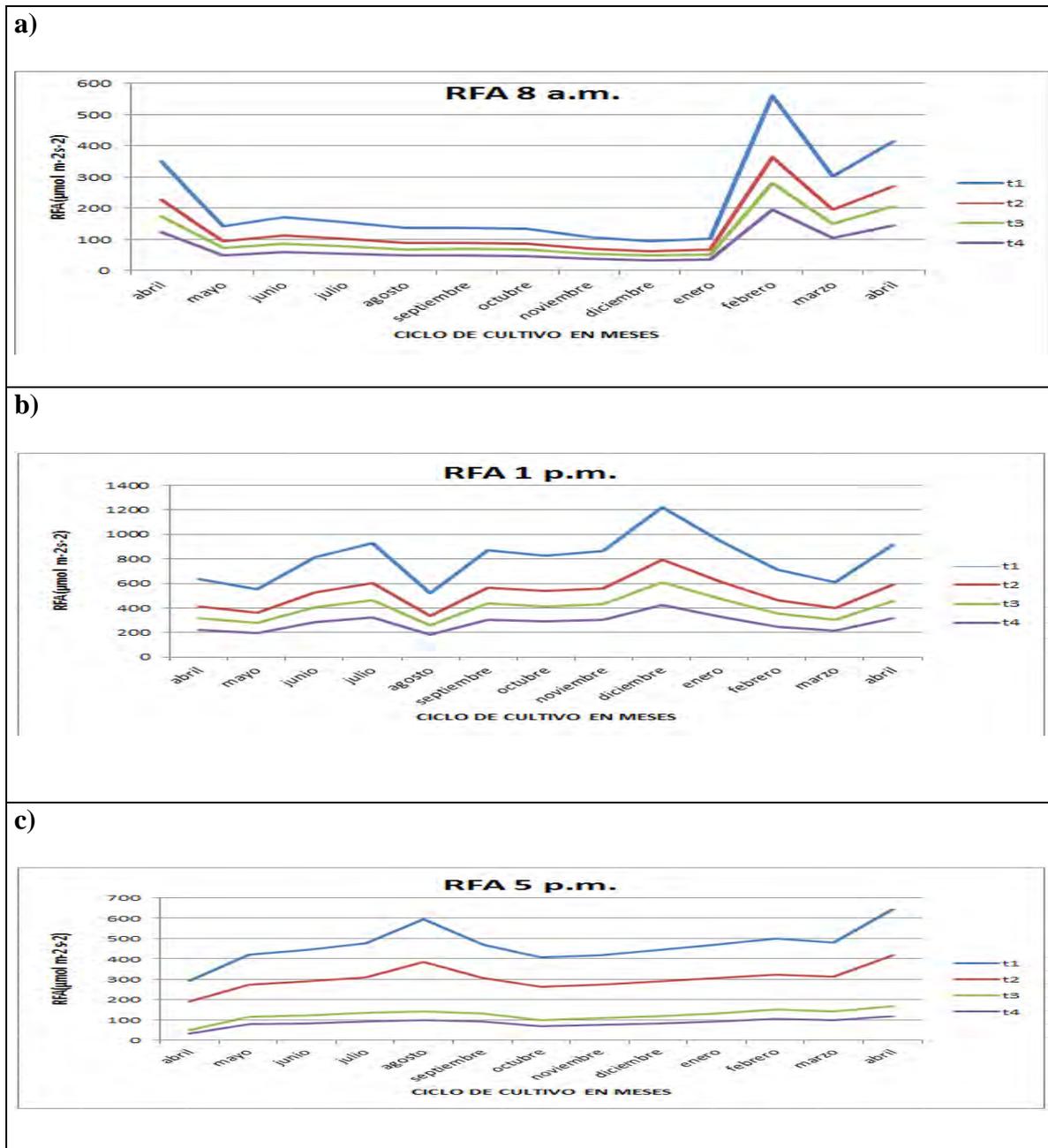


Figura 4. Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 8am. b) Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 1pm.c) Comportamiento de la variable luminosidad, medida en radiación fotosintéticamente activa (RFA), en el ciclo del cultivo a las 5pm.

Fuente este estudio

Se debe tener en cuenta que el sombrero proviene de la adecuación de materiales artificiales (uso de polisombra de diferentes densidades) y que no se utilizaron especies arbóreas para generar este efecto dentro de los tratamientos; posiblemente por esta razón, el cambio en las variables de radiación fotosintéticamente activa con polisombra artificial como método de sombrero, difiere de los estudios realizados con la utilización de agrosistemas como método de sombrero tal como lo aclara Jaramillo (2005) quien encontró que la radiación se expresa como un porcentaje de la radiación incidente en la parte externa del cultivo y se debe asociar con la cantidad real de radiación medida, que ingresa al agrosistema.

3.2 Índices de Crecimiento

3.2.1 Variables de Crecimiento.

El análisis de varianza (Tabla 3) indica que en las variables altura de planta, biomasa seca (raíz, tallo, hojas, total), longitud de ramas (estrato bajo, medio y alto), número de nudos por rama (estrato alto), se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados; para la variable número de nudos en el estrato bajo y medio no se presentaron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos evaluados en este estudio, indicando que el nivel de sombreado afectó significativamente el crecimiento de las plantas. Esto concuerda con lo encontrado por Gómez (1977), Jaramillo y Valencia (1980) quienes mencionan que existen factores que influyen en el crecimiento vegetativo y se relacionan indirectamente con los factores ambientales, entre ellos, la precipitación, brillo solar, temperatura y evapotranspiración y disponibilidad de nutrientes y defoliación de la planta, (Barros *et. al.* 1999).

Tabla 3.

Análisis de Varianza para las variables altura de planta, biomasa seca (raíz, tallo, hojas, total), longitud de ramas (estrato bajo, medio, alto), número de nudos por rama (estrato bajo, medio, alto) en cuatro tratamientos correspondientes a diferentes niveles de sombreado del cultivo de café año 2015.

Fv	Gl	Altura Planta	Biomasa seca				Longitud de Ramas			Número de Nudos		
			hojas	tallo	raíz	total	bajo	medio	alto	bajo	medio	alto
Trata	3	15,91*	6,73*	9,12*	11,31*	8,83*	6,74*	6,53*	9,33**	2,51ns	1,93ns	7,31*
Rep	2	0,88	0,52	0,15	0,68	0,3	0,19	0,02	0,22	0,29	1,59	1,42
Error	6	16,06	420,31	34,47	6,41	713,42	14,06	6,95	3	0,937	0,47	0,131
Cv		7,11	38,54	23,09	20,89	29,43	13,42	11,79	18,96	12,83	11,21	13,83

*= Nivel de significancia al 5% de probabilidad; ns = sin diferencia estadística significativa.

3.2.1.1 Área foliar.

Al analizar el comportamiento del área foliar (figura 5), se observó una influencia positiva del sombreado, ya que los valores más altos se presentaron en el tratamiento con mayor porcentaje de sombrero (T4 65%); igualmente, los tratamientos T2 y T3 (35% y 50 % de sombrero respectivamente) presentaron un comportamiento similar a lo largo del ciclo del cultivo, aunque al final de las evaluaciones, los valores de AF en estos dos tratamientos fueron inferiores al área foliar alcanzada por T4. Todos los tratamientos con sombra mostraron valores superiores al área foliar al tratamiento a libre exposición solar (T1).

Los modelos correspondientes a cada uno de los tratamientos se ajustaron a modelos de tipo lineal con un R^2 superiores al 74% de ajuste.

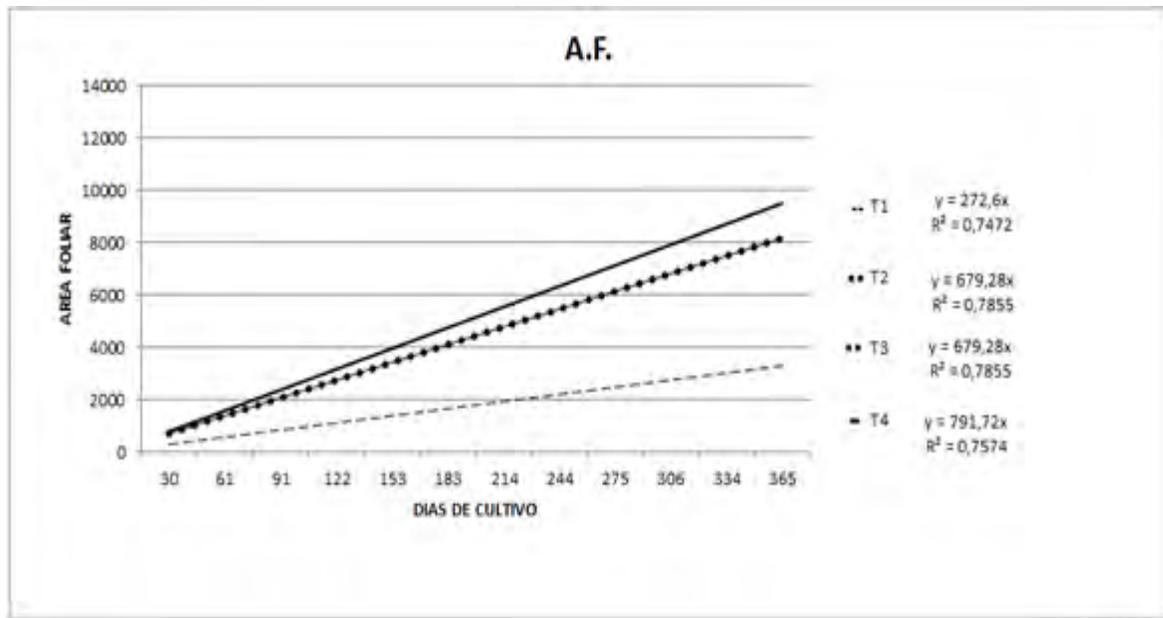


Figura 5. Comportamiento de la variable Área Foliar durante los primeros doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.

Fuente este estudio

La variable área foliar (AF) en los tratamientos T2, T3, y T4, presenta una tendencia ascendente durante todo el periodo de evaluación. A diferencia de los tratamientos con algún grado de sombra, el tratamiento con iluminación plena incrementó su AF hasta el mes de diciembre, para luego decrecer y estabilizar su crecimiento hasta el final de las evaluaciones; la escasa pluviosidad y baja humedad de suelo, que se evidenciaron a lo largo de las evaluación es de las variables climáticas, unida a la presencia de vientos provocó una fuerte defoliación traducida en la caída de los valores de área foliar (AF). Puede afirmarse que el mejor modelo que es el T4 cuya pendiente ($b = 791.72$) fue superior a los demás tratamientos.

En este sentido, la dinámica de la mortalidad foliar en café es poco conocida; algunos datos obtenidos por Cenicafe (2009), muestran un amplia variación en cuanto a la duración de las hojas así: cafetales al sol entre 132 y 571 días (promedio 354 días), y en cafetales a la sombra entre 176 y 522 días (385 días promedio), con una mayor frecuencia de caída de las hojas entre

los 10 y 12 meses de edad, lo que coincide con este estudio en donde después del mes de diciembre empieza una defoliación considerable, la cual se evidenció cuando se hizo el conteo de número de hojas por planta, en el tratamiento sembrado a libre exposición solar (T1); estudios realizados por Cenicafe (2009) encontraron que el área de hojas verdes es el principal y mayor determinante de la absorción de la luz y de la fotosíntesis del cultivo. Bajo condiciones óptimas, la intensidad de la luz y la temperatura son los factores medioambientales que más influyen en la tasa de expansión foliar. La intensidad de la luz determina la tasa de fotosíntesis y por lo tanto el suministro de asimilados para las hojas mientras que la temperatura afecta las tasa de división y expansión foliar Cenicafe (2009).

La dinámica de crecimiento del área foliar (AF), en los cuatro tratamientos evaluados fue superior en los periodos de lluvias (mes de septiembre a diciembre), que el tratamiento testigo (sembrado a libre exposición solar), como se observa en las gráficas de las variables climáticas, se pudo establecer que el crecimiento se detiene cuando inicia el segundo periodo de sequía; estos resultados coinciden con los obtenidos en estudios realizados por Cenicafe (2013), quienes determinaron que en la zona cafetera del centro del país se presentan dos meses consecutivos de lluvia, por debajo del valor mínimo requerido por el cultivo, que hace necesario manejar sistemas de sombrero y recomendar prácticas de conservación del agua en el suelo con el fin de que el cultivo no se afecte.

3.2.1.2 Índice de área foliar.

Los resultados del índice de área foliar, se presentan en la figura 6, la tendencia de los tratamientos que se encuentran sembrados bajo sombrero los cuales presentan los valores más altos en relación al tratamiento sembrado a libre exposición solar, este comportamiento se describe durante el periodo de abril a agosto del primer año, en donde no se observan cambios en la variable en los diferentes tratamientos, al ser este un periodo caracterizado por el bajo nivel de

precipitación, a partir del mes de septiembre (inicio del periodo de lluvias para la zona sur), el índice de área foliar empieza a incrementarse de manera considerable presentando valores más altos en todos los tratamientos sembrados bajo sombrío artificial, siendo el tratamiento T4 (65% de sombra), el que presenta los mayores cambios (0,7) en dicha variable, y se puede determinar que inclusive durante el inicio del segundo periodo seco, enero y febrero del siguiente año, esta tendencia continua, caso contrario a lo observado con el tratamiento sembrado a libre exposición solar, el cual no logra valores considerables en esta variable (0,15) en relación con los otros tratamientos sembrados bajo sombrío T2 (0,6) y T3 (0,6) al final del periodo de evaluación.

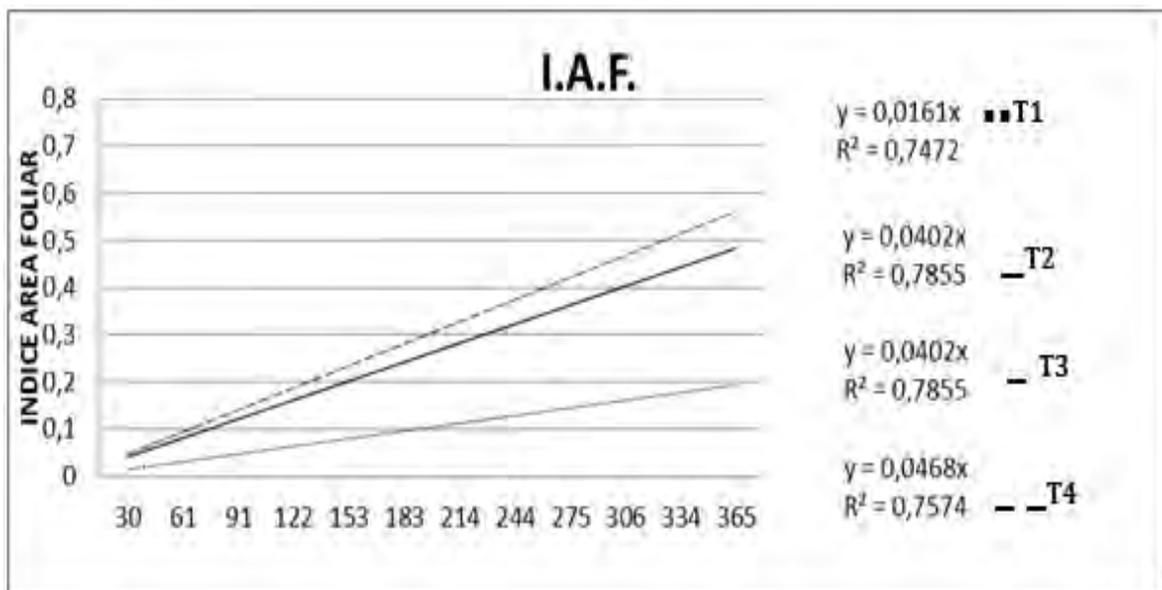


Figura 6. Comportamiento de la variable índice de área foliar en los doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.

Fuente este estudio

Al analizar la variable índice de área foliar (figura 6) se observó una influencia positiva del porcentaje de sombrío. Para el tratamiento de 65% de sombra (T4), las plantas mostraron los más altos valores en el coeficiente de x (0,0468), seguida de los tratamientos 2 (35%) y 3 (50%) respectivamente. El índice de área foliar obtenido en el tratamiento testigo (libre exposición

solar) con un coeficiente bajo (0,0161) en comparación a los tratamientos bajo sombra. Lo anterior puede deberse al hecho de que el sombrero al potenciar el metabolismo celular favorece el incremento del área foliar cuando están las plantas sembradas bajo sombra.

El sombreado es una técnica creciente en las plantaciones de café en diferentes regiones del país, la utilización de esta técnica depende del conocimiento de la variación del periodo de lluvias y índice de área foliar (IAF), teniendo en cuenta que el área foliar del cultivo es la responsable de las mayores pérdidas de agua. Por lo tanto, el estudio de esta variable permite la estimación de las necesidades hídricas del cultivo, así como identificar las mejores estrategias de gestión de irrigación, que permitan el uso más eficiente, económica y ambientalmente sostenible, debido a la escasez de este recurso para la agricultura (Santinato *et al.* 1997).

Al respecto (Farfan *et al.* 2003) mencionaron que un criterio fundamental en los aumentos de la producción agrícola de la última mitad del siglo es el incremento de la interceptación de la radiación solar por las plantas cultivadas, ya sea por cambios en su arquitectura o por aumentos en la densidad de población, lo que ocasiona un incremento del área foliar total capaz de interceptar y convertir dicha energía lumínica en energía cosechada, en donde cultivos de café con edad de 15, 17 y 20 meses presentan valores de índice área foliar de 0,27, 0,58 y 0,68 respectivamente, lo cual concuerda con este trabajo puesto que en el periodo final de evaluación cuando el cultivo de café se aproxima a los 12 meses de edad el IAF llega a 0,56 en el tratamiento T4 (65% de sombra) y a 0,48 para los tratamientos T2 y T3 (35 y 50% de sombra); el tratamiento T4 por estar sometido a una mayor penumbra (65% de sombra) tiende a aumentar su área foliar para interceptar la radiación que necesita.

Según Cenicafe, (2009) a medida que avanza el desarrollo del cultivo, comienza el autosombreado entre las hojas y por encima de un IAF de tres (3m^2 de hoja / 1m^2 de terreno),

los incrementos de área foliar nueva no repercuten en la interceptación de luz. En este momento la fase exponencial del crecimiento ha pasado a la fase de crecimiento lineal cuando el agua y el nitrógeno son óptimos.

Se debe aclarar que todos los tratamientos bajo sombra, constaban de material inerte (polisombra plástica) ya que esta interacción de sombrero artificial no genera cambios considerables en humedad relativa y temperatura, como se observa en las gráficas de las variables climáticas, que influyeron de manera directa en las variaciones de índice de área foliar. Es importante cuantificar el grado de sombra adecuado que producen las especies arbóreas que podrían asociarse al cultivo de café y poder relacionar de manera directa la radiación disponible con el crecimiento, el área foliar, la producción entre otros (Farfan *et al.* 2003).

3.2.1.3 Intensidad De Asimilación Neta.

Como se puede observar en la figura 7, el tratamiento T2 correspondiente a un nivel de sombra del 35%, presentó en el quinto mes los mayores valores de asimilación neta en comparación a los demás tratamientos; los tratamientos con niveles de sombra del 50% (T3) y 65% (T4), mostraron similares comportamientos al tratamiento a libre exposición (T1).

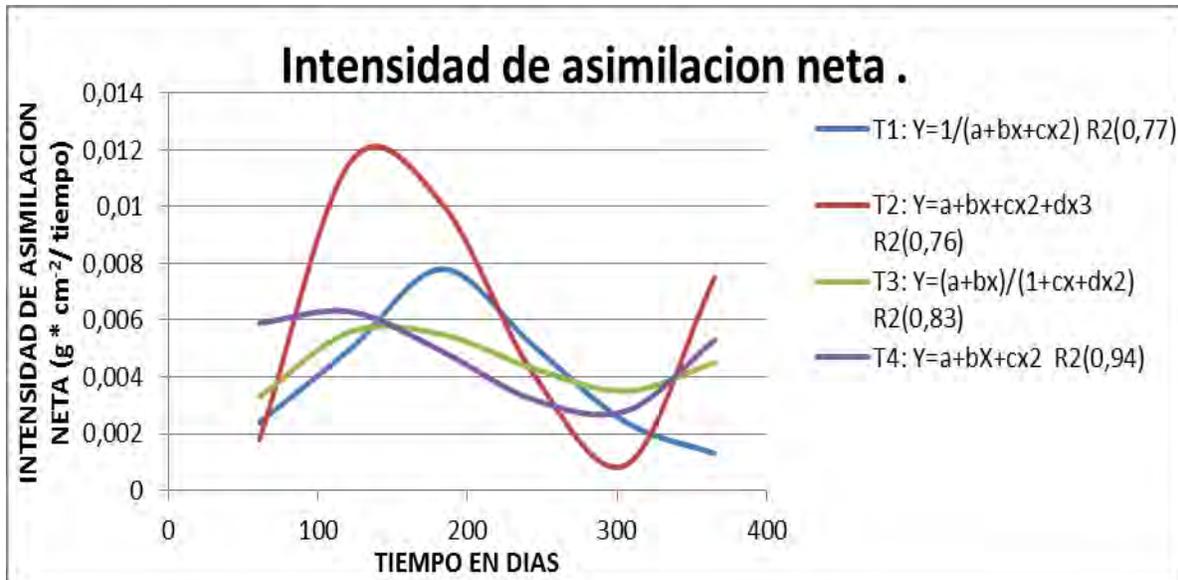


Figura 7. Comportamiento de la variable intensidad de asimilación neta en los doce primeros meses del ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos.

Fuente este estudio

Dentro de los modelos obtenidos para este estudio, el mejor, lo presento el tratamiento T2 (35% de sombra) con un modelo Polinomial de grado tres, seguido por los tratamientos T1 con un modelo de Harris (libre exposición solar), T3 (50% de sombra) con un modelo racional y T4 (65% de sombra) con un modelo cuadrático, el tratamiento T2 el cual presenta mayores variaciones, posee un R^2 de 77%.

En el tratamiento sembrado con un porcentaje de sombrero del 35% (T2) se observan los valores más altos en cuanto al índice de asimilación neta, entre los 100 y 200 días de cultivo, lo cual permite afirmar que la planta utiliza esta luminosidad de manera más eficiente en comparación a los demás tratamientos bajo sombrero T3 y T4 (50 y 65%), mientras que el tratamiento a libre exposición solar (T1), incrementa su IAN, en los primeros 60 días de cultivo, después de los 200 días de cultivo empieza un descenso que se mantiene hasta la última evaluación (365 días de cultivo). Farfan y Jaramillo (2009) confirman que la asimilación neta

depende de numerosos factores, puesto que a medida que avanza el ciclo del cultivo, la planta empieza a experimentar procesos de una rápida asimilación de la radiación (periodo del cuarto al octavo mes, periodo de lluvia) y comienza su declive a partir del noveno al décimo mes (periodo de sequía), pasando por un estado de reactivación (últimos dos días del cultivo). Smart y Robinson (1991) resumen el efecto de las condiciones ambientales, sobre el comportamiento de las plantas, en que las estomas se abren y se cierran como respuesta a la radiación. El aumento de la conductancia estomatica que se produce en las primeras horas de la mañana se debe principalmente a la luz (Loveys, 1996). A medida que avanza el día la planta transpira, y cuando es incapaz de traslocar el agua suficiente desde las raíces para satisfacer las tasas de transpiración, cerrará parcial o totalmente los estomas. Avanzada la tarde, si las condiciones ambientales vuelven a ser propicias, la planta abrirá de nuevo las estomas. Pero en cualquier caso, al atardecer como consecuencia de la caída de la luz, éstos se cerrarán y permanecerán así durante toda la noche, bloqueando el proceso fotosintético, como se evidencio en el tratamiento sembrado bajo libre exposición solar (T1), en donde la radiación alcanzaba valores muy superiores a los evaluados para los tratamientos bajo sombrío (T2, T3 y T4), como se relacionan en las gráficas de radiación fotosinteticamente activa a lo largo del ciclo de cultivo evaluado.

3.2.1.4 Índice de crecimiento relativo.

Como se puede observar en la figura 8, el tratamiento dos (T2) presentó los valores más altos en cuanto al crecimiento relativo del cultivo en el periodo de 100 A 150 días de cultivo, teniendo un modelo racional con un R^2 de 0,90; cabe resaltar que el tratamiento T3 (sembrados a 50% de sombra) con un modelo racional y un $R^2 = 0,83$; no presentan un comportamiento diferente al tratamiento testigo T1 (libre exposición solar) que presento un comportamiento cuadrático con un $R^2 = 0,96$, lo que permite inferir que el uso excesivo de sombreado puede llevar a un retraso en el crecimiento, puesto que el tratamiento expuesto a mayor penumbra (T4,

65 % de sombra) presento un comportamiento Polinomial en grado tres con un $R^2 = 0,74$; pero no se diferencia de tratamientos T3 y T1.

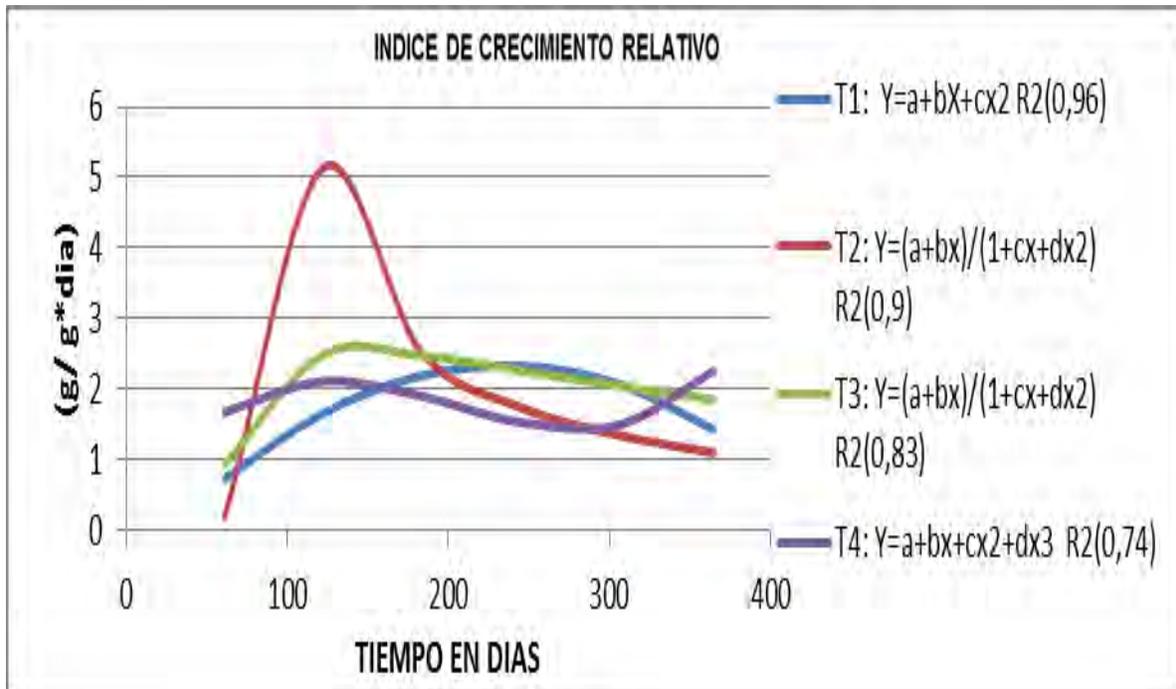


Figura 8. Comportamiento de la variable índice de crecimiento relativo en los doce primeros meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.

Fuente este estudio

Myster and Moe (1995) afirman que las diferencias diarias de temperatura y caídas de temperatura, tienen efectos en el crecimiento del cultivo, si bien en este estudio se relaciona los cambios diarios de temperatura (altas amplitudes térmicas), en los cuales las diferencias son mínimas, es importante mencionar que el periodo en el que más el índice de crecimiento de cultivo aumenta sus valores, es en el periodo 50 hasta los 150 días de cultivo (periodo de mayo a septiembre), , para el tratamiento sometido a 35% de sombra (T2), es este periodo el de mayor ganancia de crecimiento (5), mientras que el tratamiento T3 y T4(50 y 65 % de sombra) solo llegan a valores de 2,7 en el mismo periodo, para el caso del tratamiento testigo T1 (libre exposición solar), sus valores de índice de crecimiento no superan el número dos y durante todo

el ciclo de cultivo está por debajo de los tratamientos sembrados bajo sombra, cabe resaltar que el periodo de mayo a septiembre coincidió con el inicio en la división y formación de órganos de la planta de café, después de doscientos días y hasta el los 370 días de cultivo, no se observan cambios numéricos considerables en el cultivo debido posiblemente al cese de crecimiento vegetativo y a la entrada de la fase de ciclo reproductivo del mismo, lo cual es determinado para todos los tratamientos independientemente de si hay o no sombreado.

Swisher, (1999) demostró la interacción entre las variables precipitación y temperatura ambiente de la zona, observando una relación directa con la temperatura, y la ganancia de grados día en relación al crecimiento y desarrollo del cultivo y mencionó que durante agosto, época de verano, se incrementó la temperatura y disminuyeron las precipitaciones, que en cultivo a plena exposición solar causan un exceso de temperatura que repercute en descenso del crecimiento, como se observó en las gráficas de las variables climáticas en especial en el cultivo sembrado bajo libre exposición solar (T1); el desarrollo fisiológico relacionado con la elevación de la temperatura en la planta está acompañada de una baja la humedad del suelo, causando condiciones favorables; en plantaciones bajo sombrío, se forman microclimas dentro de las plantaciones de café, que evitan ese exceso de temperatura y baja de humedad del suelo cuando se utilizan especies vegetales determinadas, en este estudio no se presentaron variaciones entre los tratamientos con sombrío y el tratamiento sembrado a libre exposición solar, lo cual permite inferir que la temperatura no afectó solo dentro de los microclimas generados al interior de cada tratamiento, sino que estos dependen igualmente de la humedad del suelo y de la precipitación, independientemente del sombreado; es importante mencionar que en este caso el sombrío es un efecto generado por un material sintético que, si bien, interfiere en la entrada de los rayos solares, no modifican sustancialmente las variables ambientales mencionadas como si lo hacen las especies arbóreas que generan sombrío.

3.2.1.5 Índice de crecimiento del cultivo.

En las evaluaciones del ICC, los valores fueron siempre crecientes en los tratamientos sembrados bajo sombrío; los tratamientos con sombreado presentan bajos incrementos en las etapas iniciales del cultivo, y valores que se incrementaron fuertemente a partir de los 250-300 días con un modelo de tipo Polinomial en grado tres y racional con unos valores de R^2 entre 0,88 y 0,96 para los tratamientos T2, T4 y T3. El testigo (T1) presento un bajo ICC durante todo el primer año de cultivo con un comportamiento ajustado al modelo de Richards y de un $R^2 = 0,90$, como lo muestra la figura 9.

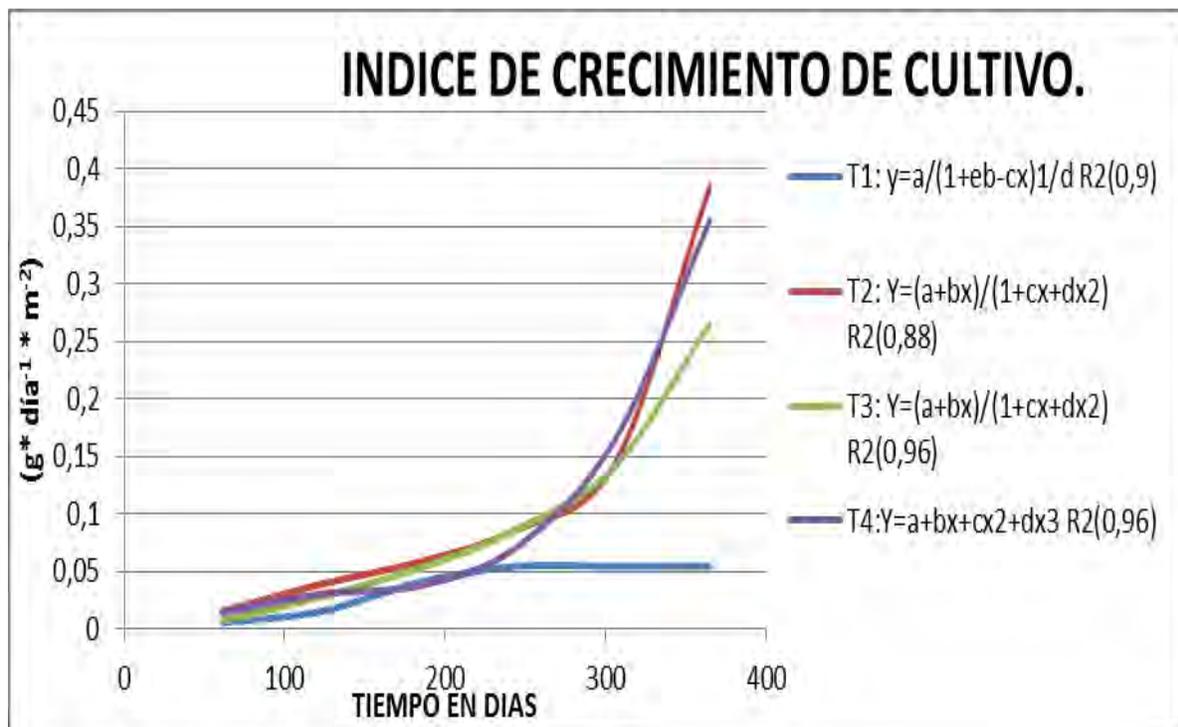


Figura 9. Comportamiento de la variable índice de crecimiento de cultivo en los doce meses de ciclo de cultivo para los diferentes tratamientos evaluados.

Fuente este estudio

El comportamiento de la variable ICC, coincide con los estudios realizados por Camayo *et. al.* (2003), los cuales evaluaron el comportamiento fisiológico del cultivos de café bajo

sombrío y encontraron que el resurgimiento notorio del crecimiento en extensión y desarrollo se da de manera más pronunciada en los periodos de septiembre-octubre, con una buena disponibilidad hídrica y energética; aunque en el periodo enero-febrero y marzo, (250 a 350 días de cultivo) se presentó una tendencia marcada en el déficit hídrico, su efecto sobre el crecimiento y el desarrollo no fue notorio en los tratamientos T2, T4 y T3; si bien en los periodos de sequía el crecimiento de la planta continua, lo hace con menor velocidad, en relación a periodos de tiempo donde el agua no es un factor limitante. Además la radiación solar, por su cantidad y distribución espectral, juega un papel importante en la regulación del crecimiento y desarrollo vegetal, cuando se siembra a libre exposición solar (Farfan *et. al.* 2003).

Los resultados encontrados por Gómez *et al.* (1991) y Camayo *et al.* (2003), demostraron que la presencia de condiciones climáticas favorables, como buena disponibilidad hídrica y energética son claves para el crecimiento vegetativo permanente en las diferentes regiones donde se establece los cultivos, como se observó en este ensayo en donde los tratamiento sembrados bajo sombrío (T2, T3 y T4), presentan condiciones climáticas menos extremas, como se observa en las gráficas de humedad relativa, radiación fotosinteticamente activa y temperatura, en comparación al tratamiento sembrado bajo libre exposición solar (T1), la cual presento los menores valores de crecimiento y las condiciones climáticas más extremas.

En las investigaciones realizadas por Camayo *et., al.* (2003), y de acuerdo a los modelos ajustados que se utilizaron para observar el crecimiento fisiológico, se atribuye los bajos valores de crecimiento vegetativo, al estrés hídrico, el brillo solar y la temperatura, los cuales favorecen la maduración de la planta de café, y encontraron que el déficit hídrico podría ser el factor más limitante en condiciones de cultivo a libre exposición solar, coincidiendo con lo encontrado en este trabajo, donde el testigo T1 (libre exposición solar), parece estar afectado de manera directa por las condiciones ambientales; su crecimiento nunca fue superior independientemente de los

periodos evaluados (365 días de cultivo), y estuvo siempre por debajo de los tratamientos sembrados bajo sombra.

La alta variabilidad en el comportamiento de la variable crecimiento de cultivo de los diferentes tratamientos puede explicarse si se tiene en cuenta que los eventos fisiológicos de las plantas dependen de muchos factores internos y externos, tal como lo afirman, Myster y Moe (1995) quienes indican que las plantas de café son más sensibles a las fluctuaciones de temperatura en días cortos que en días largos. Igualmente, Mes, (1957) estudió diferentes combinaciones de temperatura día/ noche en cuatro variedades de café (*coffea arabica*) y observó que el crecimiento en café fue estimulada cuando la relación temperatura día/noche fue de 23°/17°C e inhibida cuando fue superior a 30°c e inferior de 17°C el desarrollo posterior de las flores fue acelerado a altas temperaturas y retardado a bajas temperaturas.

3.2.1.6 Altura de Planta.

En la tabla 4 se presenta la prueba de comparación de promedios correspondientes a la altura de planta en los diferentes tratamientos. La altura de plantas obtenida en los tratamientos T2, T3 y T4, fue de 59,16cm, 59,33cm y 68,83cm, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos pero con diferencias al compararse con el T1, que presentó una altura de 42,83cm.

Tabla 4.

Prueba de comparación de medias para las variables altura de planta, biomasa seca de hojas, tallo, raíz, y total, Longitud de ramas en el tercio bajo, medio, alto y número de nudos por rama, obtenido con diferentes niveles de sombreado en el ecotopo 221A (Nariño) 2015.

VARIABLE	ALTURA DE PLANTA (cm)	BIOMASA SECA (g)				LONGITUD DE RAMAS (cm)			NUDOS POR RAMA
		HOJAS	TALLO	RAIZ	TOTAL	BAJO	MEDIO	ALTO	
T1	42,83B	9,07B	10,61B	4,87B	24,56B	19,75B	16,91B	4,75B	1,83B
T2	59,16A	79,29A	33,58A	15,85A	128,73A	29,33AB	25,16A	9,83A	2,66AB
T3	59,33A	57,72AB	26,93AB	13,84A	98,49AB	30,16AB	22,16AB	10,16A	2,83AB
T4	68,83A	79,29A	30,55A	13,91A	111,13A	32,50A	25,16A	11,83A	3,16A

*letras diferentes indican diferencia estadística entre los tratamientos.

En plantaciones de café cultivadas con niveles de irradianza baja o relativamente baja es común observar respuestas de plantas con adaptaciones a ambientes sombreados, por ejemplo: punto de compensación de luz bajo (Rena *et al.* 1994), aumento del área foliar específica, reducción en el grosor de la cutícula, aumento de la altura de la planta, como se observó en este trabajo en donde el café sin sombra fue presentando alturas inferiores a los tratamientos sembrados bajo sombra.

La cantidad de radiación solar y el agua disponible en el suelo son dos factores que interactúan, particularmente en ambientes secos; por lo tanto, las respuestas de las plantas a la luz o a la sombra están muy afectadas por la disponibilidad hídrica. No obstante, los efectos de la interacción que se pueden identificar en cada caso varían dependiendo sobre todo de la variable de respuesta (ecofisiológica, crecimiento, supervivencia) de las especies y de la variabilidad climática (Valladares *et al.* 2005).

3.2.1.7 *Biomasa seca*

Biomasa seca total. La tabla 4 muestra la prueba de comparación de Tukey (0,05) para los promedios de biomasa seca obtenidos con los diferentes tratamientos. El cultivo a libre exposición (T1; 24,56g) y el tratamiento con 50% de sombra (T3; 98,49g) se comportaron estadísticamente similares en la biomasa total; los tratamientos con 35% de sombra (T2; 128,73g) y 65% de sombra (T4; 111,13g), fueron estadísticamente superiores a los dos primeros.

Biomasa de seca de Raiz., todos los tratamientos con sombra T2 (15,85g), T3 (13,84g) y T4 (13,91g) presentaron una mayor biomasa radical que el tratamiento T1 (4,87), presentando diferencias estadísticas (Tabla 4).

Biomasa seca de Tallos. En esta variable se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento T4 (30,55 g), T2 (33,58 g) y el tratamiento testigo T1 (10,61 g), pero no se encuentran diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos T3 (26,93) y T1 ni tampoco entre los tratamientos bajo sombra (T2, T3 y T4), como lo representa la prueba de Tukey (Tabla 4).

Biomasa seca de Hojas. Para esta variable se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento T4 (79,29), T2 (79,29 g) y el tratamiento testigo T1 (9,07g), pero no se encuentran diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos T3 (57,72) y T1, ni tampoco entre los tratamientos bajo sombra (T2, T3 y T4) como lo representa la prueba de Tukey (Tabla 4).

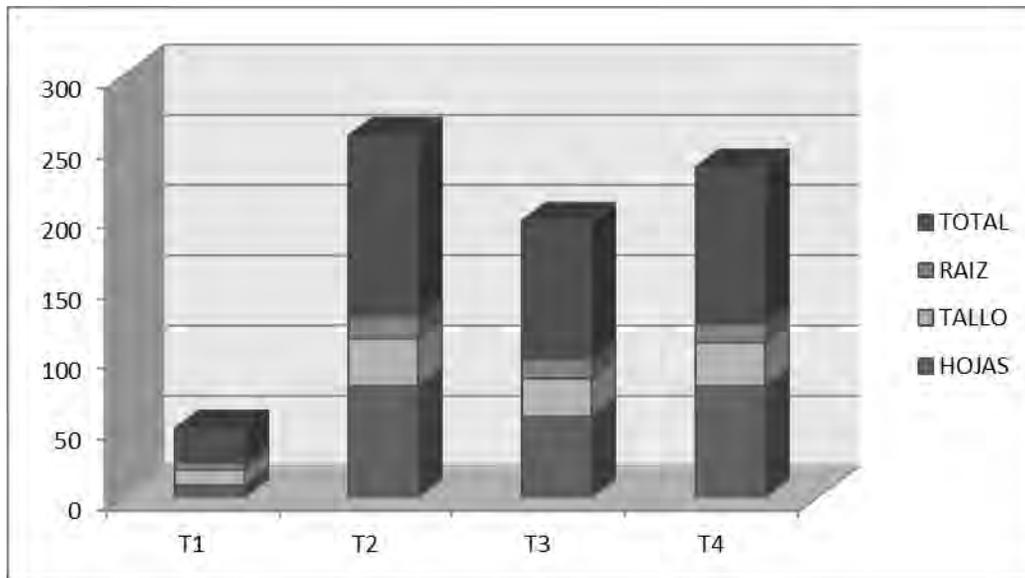


Figura 10. Comportamiento de la variable Biomasa seca de Total, Raíz, Tallo, Hojas, en los tratamientos T1, T2, T3 y T4.

Fuente este estudio

Como lo muestra la figura 10, estos resultados coinciden con los reportados por Arcila (2009) y Schroth *et al.* (2001) cuando afirman que los tratamientos sembrados bajo sombrero presentan valores más altos de biomasa de raíces, basados en los resultados obtenidos con un sistema de sombrero de guamo (*Inga sp.*); la densidad aparente y el espacio poroso que son propiedades importantes y que están influenciadas por las condiciones climáticas que determinan las condiciones ideales para el desarrollo y distribución de las raíces, con base en este parámetro se puede determinar que el mal desarrollo radical puede causar problemas de anclaje, alta incidencia de mancha de hierro y cosechas de mala calidad, entre otros, tal como sucedió en este estudio donde el tratamiento sembrado bajo libre exposición solar (T1) presentó los valores más bajos en la biomasa seca de las raíces (4,87gr).

El desarrollo del sistema radical de un árbol es un proceso muy complejo que involucra muchos factores internos y ambientales, y sus interacciones. Entre los factores ambientales se

encuentran el índice de humedad del suelo (capacidad de campo, exceso y déficit de agua), la disponibilidad de nutrimentos, la luminosidad, condicionante en relación con el aumento de temperatura y la disponibilidad de agua necesaria para el buen desarrollo del sistema radical y el estrés mecánico. En general, existe muy poca información cuantitativa sobre todos los aspectos del desarrollo radical de los árboles (Coutts *et al.* 1999).

Igualmente los resultados observados en la gráfica 10, coinciden con la afirmación de Riaño *et al.* (2004) cuando afirma que el potencial de acumulación de la materia seca es modulada por la distribución de asimilados entre los frutos y los órganos vegetativos durante su etapa de crecimiento exponencial, y que este proceso está íntimamente relacionado con la oferta ambiental.

Los órganos vegetativos responden continuamente al estímulo de la radiación y es esta la que modifica en muchos casos la estructura y la longitud de los mismos como lo menciona Niklas, (1994) y Anten *et al.* (2005) quienes realizaron un análisis de las relaciones dimensionales de tallos y hojas de cada una de las tres categorías de ejes identificadas en el presente estudio (tronco, ramas principales y ramas terminales) concluyendo la función que cumple cada una de estas categorías. El tronco presenta unidades de alargamiento con bajas relaciones entre la longitud y el peso del tallo y entre el área foliar y el volumen del tallo. Dados estos resultados, podría concluirse que el tronco estaría más capacitado que las ramas cortas para soportar la carga estática debida a su propio peso y el de sus ramas, así como la carga dinámica debida al viento y que es en la parte terminal en donde se presenta la mayor elongación de los tejidos la cual es más influenciada por las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento), y por eso en esta zona de la planta es donde se presentan mayores variaciones en relación a los demás tercios evaluados.

3.2.1.8 Longitud de ramas

Tercio Alto. En la tabla 4, se observa la prueba de Tukey (0,05) para la variable longitud de ramas en los tercios bajo, medio y alto, de las plantas de café en cada tratamiento; los sistemas que se encuentran sembrados bajo sombrío (T2, T3 y T4) presentan las mayores longitudes en el tercio alto evaluado, en comparación al tratamiento sembrado a libre exposición solar (T1).

Tercio Medio. Para este tercio de la planta, los tratamientos sembrados bajo sombrío T4 (25,16cm) y T2 (25,16cm) presentan diferencias estadísticas significativas, al tratamiento T1(16,91cm) sembrado a libre exposición solar, pero este a su vez no presenta diferencias con el tratamiento T3 (22,16cm), el cual está sembrado bajo sombrío del 50% (Tabla 4).

Tercio Bajo. En este tercio de la planta el tratamiento sembrados bajo sombrío de 65% T4 (32,50cm) presentan diferencias estadísticas significativas, con el tratamiento T1 (19,75cm) sembrado a libre exposición solar, pero este a su vez no presenta diferencias con el tratamiento T3 (22,16cm), el cual está sembrado bajo sombrío del 50% y el tratamiento T2 (29,33cm), sembrado bajo 35% de sombra (Tabla 4).

En los resultado de la variable longitud de ramas en sus tres tercios, se puede observar que el tratamiento donde se obtuvo la mayor longitud en las ramas del tercio bajo (32,5cm) fue el de mayor porcentaje de sombrío (T4 65% de sombra), con diferencias estadísticas respecto al tratamiento testigo (T1) con 19,75cm; no se presentaron diferencias entre los demás tratamientos. En el tercio medio, fueron los tratamientos T2 y T4 los que permitieron una mayor longitud de ramas (25,16cm y 25,16cm) con diferencias estadísticas al compararse con T1(16,91cm) pero sin diferencias con T3 (22,16cm); en el tercio superior, los tres tratamientos sombreados (T2, T3 y T4) mostraron mayores longitud de ramas que el testigo T1 (4,75cm) .

Estos resultados se pueden comparar con las investigaciones realizadas por Barthélémy & Caraglio (2007) quienes evaluaron el comportamiento de la elongación de tejidos en numerosas

especies leñosas, y concluyeron que cada eje constituyente del sistema caulinar suele alargarse en forma constante, de modo que alternan períodos de alargamiento de los ejes y períodos en los cuales la longitud de los mismos se mantiene constante. En general, lo anterior permite agrupar a las porciones de un eje correspondientes a sucesivos períodos de alargamiento, en «*unidades de alargamiento*» (UA). La UA puede ser considerada una unidad estructural y funcional de un eje, dada la relativa simultaneidad con que se desarrollan el tallo y las hojas que la componen están determinadas por factores ambientales como la disponibilidad hídrica, la humedad y la luminosidad que condicionan estos comportamientos.

En las evaluaciones realizadas en este estudio y después de encontrar que se presentan diferencias estadísticas en los tercios bajo y medio y alto, en donde se encuentran las partes más jóvenes de la planta; esto permite determinar que esta zona, mayormente influenciada por la condiciones climáticas especialmente la luminosidad, es la que condiciona el crecimiento vegetativo de la misma; Lo anterior coincide con lo establecido para otras especies por autores como Erwin *et al.* (1989), Myster y Moe (1995) y Thingnaes *et al.* (2003), en el sentido de que las variaciones diarias de temperatura influyen directamente sobre la longitud de entrenudos, altura de las plantas y en la floración.

De la misma forma trabajos relacionados con el crecimiento de las ramas de café presentados por Gonzales de Miguel (2007), indican que el crecimiento vegetativo es mayor cuando la duración de los días se incrementa, aunque en la zona ecuatorial tanto el crecimiento vegetativo, como la floración ocurren periódicamente. Así mismo Barros y Maestri (1974), determinaron que la curva de reducción en la velocidad de crecimiento de las ramas coincidía con las altas temperaturas, lo cual puede explicar el por qué el tratamiento T1 mostro un menor crecimiento de ramas que los tratamientos con diferentes niveles de sombreado.

3.2.1.9 Numero de nudos por rama.

El análisis de varianza (Tabla 3) para el número de nudos por ramas en el tercio bajo, medio y superior, permitió determinar la ausencia de diferencias significativas en las fuentes de variación de la variable para los tercios bajo y medio; para las ramas del tercio superior se encontraron diferencias estadísticas en el número de nudos.

La prueba de comparación de medias para el número de nudos de las ramas del tercio superior (Tabla 4), mostró diferencias estadísticas en el valor obtenido con el tratamiento T4 (3,10 nudos/rama) y el testigo T1 (1,83 nudos/rama); no se presentaron diferencias entre los demás tratamientos.

Según Castillo y López, (1966), el número de nudos formados es el principal componente de la producción de café y se puede afirmar que, aumentado el sombrero, la producción se reducirá en función del menor número de nudos formados y la disminución del número de botones florales por nudo, lo cual es contrario a lo encontrado en el presente estudio en donde el tratamiento con mayor sombreado (T4, 65% de sombra) fue el que permitió el mayor número de nudos.

Después de analizar los resultados tanto para las variables fisiológicas y climáticas contempladas en este estudio se puede afirmar que para esta zona, el café necesariamente necesita ser sembrado bajo sombrero si se quiere tener una mejor actividad fisiológica que repercuta en una alta productividad como lo menciona DaMatta y Rena (2002) y DaMatta, (2004) quienes evaluaron diferentes comportamientos fisiológicos de cultivo de café bajo sombrero y a libre exposición solar y determinaron que, es inadecuado clasificar al cafeto como una especie típica de sombra, pero sí se le puede denominar como una especie facultativa de sombra o como una especie con una plasticidad relativamente elevada de su aparato fotosintético a los cambios de la irradianza.

El número de nudos es una variable que se utiliza para cuantificar la productividad del cultivo de café; en esta investigación no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en las ramas de los tercios bajo y medio de las plantas de café lo cual coincide con lo reportado en los estudios realizados por Farfan y Urrego (2004), quienes al comparar la producción de seis cosechas de cuatro tratamientos sembrados bajo sombrío mostraron que no hay diferencia entre las producciones de café obtenidas bajo diferentes coberturas arbóreas (Nogal, pino y eucalipto), ni entre los tratamientos con sombrío y el café a libre exposición. Según Soto *et al.* 2000, el café puede estar entre el 0% y el 45% de sombra; la sombra no es universalmente benéfica, ya que las necesidades de ella están en función del clima. Aunque bajo sombrío hay una reducción de la producción del café, esta es compensada con un incremento en la longevidad del cultivo.

En muchos casos, las ramas pueden sufrir una deshidratación severa o presentar una reducción en su crecimiento, lo que puede provocar la disminución de la producción en la cosecha siguiente. Por lo tanto, la arborización o sombrío en ese contexto puede minimizar significativamente la ocurrencia de daños foto-oxidativos. Esto puede explicar, por lo menos en parte, por qué la arborización puede ser más eficiente para mantener el vigor de las plantaciones de café en regiones marginales o bajo condiciones sub-óptimas de cultivo (DaMatta, 2004).

CONCLUSIONES

El sombrío influyó de manera directa en el comportamiento de las variables fisiológicas del cultivo de café variedad Castillo ®, los tratamientos sembrados bajo sombrío crearon un microclima, modificando las variables climáticas que favoreció la conservación de la humedad del suelo, que puede ser alterada por la acción de la radiación.

Los tratamientos con diferentes niveles de sombreado artificial favorecieron el comportamiento de las variables peso seco de raíz, longitud de ramas del estrato alto y altura de planta; la biomasa seca de hojas, tallos, total y longitud de ramas del tercio medio fueron favorecidas por los tratamientos correspondientes a 65% y 35 % de sombreado.

Las variables longitud de ramas del tercio bajo y el número de nudos por rama, se vieron altamente favorecidas por el nivel de sombreado correspondiente al 65% (T4), en donde se presentaron diferencias significativas con el tratamiento sembrado a libre exposición solar (T1).

En las variables climáticas, los tratamientos bajo sombrío (T2, T3 y T4) presentan valores más altos en comparación al testigo (T1) que fue sembrado a libre exposición solar, todos los tratamientos presentan un comportamiento ascendente en los primeros cinco (5) meses de evaluación (periodo de abril a agosto) y después de este periodo todos los tratamientos presentan un decrecimiento y un comportamiento estable durante la etapa final de evaluación.

En las variables índice de asimilación neta (IAN) índice de crecimiento relativo (ICR), índice de crecimiento de cultivo (ICC), área foliar (AF) e índice de área foliar (AIF), todos los tratamientos sembrados bajo sombrío (T2, T3 y T4) presentaron valores superiores que el tratamiento testigo (T1), sembrado a libre exposición solar, durante todo el ciclo evaluado.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVARADO A., G. 2004. Comportamiento de progenies de variedad Colombia en presencia de razas compatibles de roya del cafeto. *Cenicafé* 55(1): 5-15.
- ANTEN, P. R., R. CASADO-GARCIA & H. NAGASHIMA. 2005. Effects of mechanical stress and plant density on mechanical characteristics, growth, and lifetime reproduction of tobacco plants. *Amer. Naturalist* 166: 650-660.
- ARAUJO WL, DIAS PC, MORAES GABK, CELIN EF, CUNHA RL, BARROS RS, DAMATTA F.M. 2008 Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. *Plant Physiol Biochem* 130: 1992-1998.
- ARCILA P., J. 2009 "Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de la Niña y su efecto en la caficultura". En: Colombia Avances Técnicos *Cenicafé*. vol.389 1 – 8 p.
- ARCILA P., J. 2004 Anormalidades en la floración del cafeto. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 320:1-8.
- ARCILA P., J.; BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. 2001. Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café *Coffea* sp. *Boletín Técnico Cenicafé* No. 23:1-31.
- BARROS, R.S., J.W.S. MOTA, F.M. DAMATTA Y M. MAESTRI. 1999. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crops Res.* 54, 65-72.
- BARTHÉLÉMY, D. & Y. CARAGLIO. 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Ann. Bot.* 99: 375-407.
- BEER J, MUSCHLER RG, KASS D, SOMARRIBA E 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agrofor Syst* 38:139–164.

- CAMARGO A., P. D; PEREIRA, A.R. (1994). Agrometeorology of the coffee crop. Ginebra, World Meteorological Organization, 43 p.
- CAMAYO V., G. C.; CHAVEZ C., B; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. 2003. Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchina, Caldas. CENICAFE. 54(1).
- CALABRIA C. y PUNTIERI J. 2008. Desarrollo foliar y caulinar de las unidades de alargamiento de *Nothofagus dombeyi* (*Nothofagaceae*) en condiciones de alta y baja luminosidad. Bol. Soc. Argent. Bot. 43 (1-2): 19 - 30.
- CARAMORI, P.H., C.A.KATHOUNIAN, H. MORAIS, A.C.LEAL, R.G HUGO Y A. ANDROCIOLI-FILHO. 2004. Arborização de cafezais e aspectos climatológicos. En: Matsumoto, S.N. (eds.). Arborização de Cafezais no Brasil. Edições UESB, Vitória da Conquista. 19-42.
- CARAMORI PH, GRODZKI L, MORAIS H, JULIATO H. 2003. Efeito da geada em mudas de café sob diferentes métodos de proteção. In: Book Of Abstracts Of the III Simpósio De Pesquisas dos Cafés do Brasil, Embrapa Café, Brasília. 66.
- CARAMORI PH, ANDROCIOLI FILHO A, BAGIO A. 1995. Arborização do cafezal com *Grevillea robusta* no norte do estado do Paraná. Arq. Biol. Tecnol. 38:1031-1037.
- CARDONA C., D. A.; SADEGHIAN KH., S. 2005. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombriero de *inga* spp. Cenicafé 56(2): 127-141.
- CARR M.K.V. 2001. Review paper: the water relations and irrigation requirements of Coffee. Exp. Agric. 37: 1–36.
- CASTAÑO M., A .M.; CHICA R., H. A.; OBANDO B. D.; RIAÑO H. N. M. 2012. Intercambio gaseoso en *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata* en Colombia. Revista Cenicafé 63 (1): 93-110.

- CASTILLO Z., J. LÓPEZ A., R. 1966. Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del cafeto. *Cenicafé* 17(2):51 - 60.
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-CENICAFE. 2013. *Cenicafé. CHINCHINA. COLOMBIA. Archivo de información climática. Chinchina, Colombia.*
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-CENICAFE. 2010. Investigación sobre la climatología de las zonas cafeteras Chinchina, Colombia.
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-CENICAFE. 2009. Modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia. Chinchina, Caldas. Boletín técnico No. 33.
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. CHINCHINÁ. COLOMBIA. 2000-2001, 2001-2002, 2002- 2003, 2003-2004. Selección por resistencia completa a la roya del cafeto. In: Informe anual de la Disciplina de Mejoramiento Genético y Biotecnología. Chinchiná, Cenicafé. Colombia. Boletín técnico Num 20.
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. CHINCHINÁ. COLOMBIA. 2000-2001, 2001- 2002, 2002-2003, 2003-2004. Selección por resistencia incompleta a la roya del cafeto. In: Informe anual de la Disciplina de Mejoramiento Genético y Biotecnología. Chinchiná, Cenicafé. Años
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. CHINCHINÁ. COLOMBIA. 2000-2001, 2001- 2002, 2002-2003, 2003-2004. Selección por resistencia a la enfermedad de los frutos del café (*Colletotrichum kahawae*). In: Informe anual de la Disciplina de Mejoramiento Genético y Biotecnología.
- COUTTS, M.P.; NIELSEN, C.C.N. ; NICOLL, B. C. 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root systems of conifers. *Plant and Soil* 217:1-15.
- CHAVES A; TEN-CATEN A; PINHEIRO HA; RIBEIRO A; DAMATTA FM; 2008.

Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. *Trees – Struct. Funct.*, in press. 230p.

CHAVES, C. B.; JARAMILLO, R. A.; (1997). Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. *Cenicafé* 48(2): 120-132.

DA MATTA, F.M. 2008. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86(2-3): 99-114.

DAMATTA FM, Ronchi CP, Maestri M, Barros RS. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz J Plant Physiol* 19(4):485–510.

DAMATTA FM, Ramalho JDC. 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Braz J Plant Physiol* 18:55–81.

DAMATTA, F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* 86, 99-114.

DAMATTA FM. 2004a Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* 86:99-114.

DAMATTA, F.M. Y A.B. RENA. 2002. Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno sol. En: Zambolim, L. (ed.). *O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. pp. 93-135.

DAUZAT J., RAPIDEL B. AND BERGER A. 2001. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.* 109: 143–160.

DURÁN, V., Y.; 2004. *Sistemas agroforestales*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). 56p.

ERWIN, E.J.; HEINS, R.D.; KARLSSON, M.G.1989. Thermomorphogenesis in *Lilium longiflorum*. *American Journal of Botanic.* 76(1):47-52.

- FAGERIA, N.K., V.C. BALIGAR AND R.B. CLARK. 2006: Physiology of crop production. Haworth Press, New York. 342 p.
- FAHN, A., 1990. Plant Anatomy. 2th ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 588 p.
- FARFAN V., F.; 2012. Sistemas agroforestales en el cultivo de café. Cenicafe. Chinchina, Caldas. 89 pp.
- FARFAN V., F.; JARAMILLO R., A. 2009. Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) No. 379:1-8. 98
- FARFÁN V., F.; JARAMILLO R., A. 2008. Efecto de la cobertura vegetal muerta y arbórea sobre la disponibilidad de agua en el suelo en sistemas agroforestales con café. Cenicafé, 59(1): 39 - 54. 58
- FARFÁN V., F. 2007. Producción de café en sistemas agroforestales. In: Arcila P., J.; Farfán V., F.; Moreno B., A.; Salazar G., L.F.; Hincapié G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé. p. 161-200.
- FARFAN V., F.; URREGO, B. 2004. Comportamiento de las especies forestales *Cordia allidora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* como sombrío e influencia en la productividad del café. Cenicafé 55(4): 39.
- FARFAN V., F.; MESTRE M., A. 2004. Fertilización del café en un sistema agroforestal en la zona cafetera norte de Colombia. Cenicafé 55(3): 76.
- FARFÁN V., F.; MESTRE M., A. (2004) .Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes. Cenicafé 55(2):161-174.
- FARFAN V., F.; ARIAS H., J.J.; RIAÑO H., N.M. 2003. Metodología para medir sombrío en sistemas agroforestales con café. Cenicafe 54(1): 100.
- FOURNIER LA. 1988. El cultivo del cafeto (*Coffea arabica* L.) al sol o a la sombra: un enfoque agronómico y ecofisiológico. Agron. Costarric. 12:131-146.

- FRANCK N, VAAST P, GENARD M, DAUZAT J. 2006. Soluble sugars mediate sink feedback down-regulation of leaf photosynthesis in field-grown *Coffea arabica*. *Tree Physiol* 26:517–525.
- GOMEZ, L.F.; LOPEZ, J.C.; RIAÑO, N.M.; LOPEZ, Y; MONTOYA, E.C. 2000. Diurnal changes in leaf gas Exchange and validation of a mathematical model for coffee (*coffea Arabica* L.) Canopy photosynthesis. *Photosynthetica*. 43(4): 575-582.
- GÓMEZ G., L.; CABALLERO R., A.; BALDIÓN R., J.V. 1991. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá, FNC, 131 p.
- GÓMEZ, L. 1977. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad del crecimiento del cafeto. *Cenicafe*. 28 (1): 65 p.
- GONZALES DE MIGUEL, C. 2007. Produccion de café en Honduras. Modelado de las variaciones cafeto-arbolado. Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España. 212p.
- GENTY B. and HARBINSON J. 1996. Regulation of light utilization for photosynthetic electron transport. Dordrech, Netherlands, pp. 67-99.
- GUTIÉRREZ C, M. 2003. Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis de Maestría. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 62 p.
- HERRERA E., J. S.; PALMA O., M. R.; ORDOÑEZ V., M. A.; ZUNIGA, M. D. 1995. Efecto de la aplicación de Nitrógeno en la producción de café bajo sombra de *Inga* sp. In: Seminario Nacional de Investigación y Transferencia en Caficultura, 6. Tegucigalpa, Noviembre 22-24, Memorias. Tegucigalpa, Instituto Hondureño del Café, 1997. p. 400-406.
- HUNT, R., D. R. CAUSTON, B. SHIPLEY, Y A. P. ASKEW. 2002. A modern tool for classical growth analysis. *Annals of Botany* 90: 485-488.

- JARAMILLO, R. A.; RAMIREZ, B.V.H.; ARCILA, P.J. 2011. Distribucion de la lluvia: clave para planificar las labores en el cultivo de café en Colombia. Avances técnicos Cenicafe. No. 411. 8p.
- JARAMILLO-ROBLEDO, A. 2005. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 29 (112): 371-382.
- JARAMILLO R., A. (2005). Clima andino y el café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé,. 192 p.
- JARAMILLO R., A.; 2003. La lluvia y el transporte de nutrientes dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. Cenicafe 54(2): 134-144.
- JARAMILLO R., A.; VALENCIA A., G. 1980. Los elementos climáticos y el desarrollo de *C. arabica* L. en Chinchiná (Colombia). Cenicafé 31 (4):127-143.
- KIARA, J. M.; NAGED, T. F. 1995. Establishment of rust resistant arabica coffee cultivar under temporary shade and inorganic fertilizer regimes in Papua Nueva Guinea. In: Colloque Scientifique International sur le Café, 16 Kyoto, Avril 9-14, Paris, ASIC, 1995. p. 816-820.
- LEE., S.; TEWARI R., K.; HAHN., E.; PAEK., K. (2007). Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania Somnifera* (L.) Plant Cell Tiss Organ Cult. 90:141–151 p.
- LOVEYS, B.R. 1996. Stomatal patchiness of field-grown Sultana leaves: Diurnal changes and light effects. Vitis 35:7-10.
- MAESTRI M, BARROS RS, RENA AB. 2001. Coffee. In: Last FT(ed), Tree Crop Ecosystems, pp.339-360. Elsevier Publishers, Amsterdam.
- MORENO R., L.G.; ALVARADO A.; G. 2000. La variedad Colombia: Veinte años de adopción y comportamiento frente a nuevas razas de la roya del cafeto. Boletín Técnico Cenicafé No.22: 1- 32.

- MORENO R., L.G. 2004. Obtención de variedades de café con resistencia durable a enfermedades, usando la diversidad genética como estrategia de mejoramiento. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 28(107): 187-200.
- MUSCHLER RG AND NAIR PKR. 2001a. Modification of growth environment for *Coffea arabica* by different pruning regimes of *Erythrina poeppigiana* in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 85: 131-139 p.
- MYSTER J., MOE R. 1995. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops—a mini review. 4 (2): 33 p.
- NIKLAS, K. J. 1994. *Plant allometry. The scaling of form and process*. The University of Chicago Press, Chicago & London. 2(1): 23 p.
- PALLARDY, SG. And KOZLOWSKI, TT., 1979. Frequency and length os stomata of 21 *Populus* clones. *Canadian Journal of Botany*, vol. 57, 2519-2523 p.
- PANDEY, S., KUMAR, S. And NAGAR, PK., 2003. Photosynthetic performance of *Ginkgo biloba* L. Grown under high and low irradiance. *Photosynthetica*, 1(41): p. 505-511.
- PERI., P. 1999. Efecto de la sombra sobre la producción y calidad de pasturas en sistemas silvopastoriles. *SAGPyA Forestal*, 13:35-42.
- PENG, S., HUANG, J., SHEEHY, J.E., LAZA, R.C., VISPERAS, R.M. ZHONG, X., CENTENO, G.S., KUSH, G.S., & CASSMAN, K.G. 2004. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. In E.D. Redone, A.P. Castro & G.P. Llanto, eds, *Rice integrated crop management: towards a Ricecheck system in the Philippines* p. 46-56 Nueva Ecija, Philippines.
- PIMENTEL, D., MCLAUGHLIN, L., ZEPP, A., LAKITAN, B., KRAUZ, T., KLEINMAN, P., VANCINI, F., ROACH, W.J., GRAAP, E., KEETON, W.S. and SELIG, G., 1991. Environmental and economic impacts of reducing U.S. agricultural pesticide use. IN: D.

- PIMENTEL (editor), Handbook of pest Management in agriculture, second edition,. Vol I. CRC. Press, boca raton FL. Pp. 679-718.
- POVEDA, G., JARAMILLO, A., GIL, M. M., QUICENO, N. & R. MANTILLA, 2001. Seasonality in ENSO – related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. Water Resources Research 37(8): 2169-2178.
- RAMALHO JC, QUARTIN V, FAHL JI, CARELLI ML, LEITÃO AENUNES MA. 2003. Cold acclimation ability of photosynthesis among species of the tropical *Coffea* genus. Plant Biol. 5:631-641.
- RAMÍREZ, L.F.; SILVA, G.; VALENZUELA, L.C.; VILLEGAS, A.; VILLEGAS, L.C. 2002. El café, capital social estratégico; informe final Comisión de Ajuste de la Institucionalidad Cafetera. Bogotá, FNC, 173 p.
- RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P.,J.; JARAMILLO R., A.; RENDÓN S., J.R.; CUESTA G.,G.; MENZA F., H.D.; MEJÍA M., C.G.; MONTOYA, D.F.; MEJÍA M., J.W.; TORRES N., J.C.; SÁNCHEZ A., P.M.; BAUTE B., J.E.; PEÑA Q., A.J. 2010. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, término y de brillo solar. Cenicafé 61 (2):132-158 p.
- RAO, M.R.; NAIR, P.K.R; ONG, C.K. 1997. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. Agroforestry Systems 38:3-50.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. 1999. Biology of plants. 6. ed. New York, Freeman Publishers Co. 944 p.
- RENA, A.B., R.S. BARROS, M. MAESTRI Y M.R. SÖNDAHL. 1994. Coffee. En: Schaffer, B. y P.C. Andersen, (eds.). Handbook of environmental physiology of tropical fruit crops: Sub-tropical and tropical crops. Vol. II. CRC Press, Boca Raton. pp. 101-122.
- RIAÑO,N. ARCILA, P. JARAMILLO, R., CHAVEZ, C. 2004. Acumulacion de materia seca y

extracción de nutrientes por *Coffea arabica* L. var Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. *Cenicafe*, 55(4): 256-276.

ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ÁLVAREZ H., J.R.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. 1999. Beneficio ecológico del café. Chinchiná, Cenicafé, 273 p.

SADEGHIAN K., S.; GONZALES O., H. 2012. Respuesta del café *coffea Arabica* L. a fuentes y dosis de nitrógeno en la etapa de almacigo. En congreso Colombiano de la ciencia del suelo. Scss. Bogota. Colombia.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. Irrigação na cultura do café. Campinas: Serviço Agrícola, 1997. 146 p.

SOTO P. L.; PERFECTO, I.; CASTILLO H., J.; CABALLERO N. J. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzealtal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture ecosystems and environment* 80 (1-2): 61-69.

SCHROTH., G; LEHMANN., J; RODRIGUES., M.R.L; BARROS., E; MACEDO., J.L.V. 2001. Plant - soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems* 53: 85 - 102.

SMART, R.; ROBINSON, M. 1991. Sunlight into wine: A handbook for winegrape canopy management. *Winetitles: Adelaide*. Vol 3. 88p. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 1-2 (43): 22 p.

STEIMAN SR, BITTENBENDER HC, IDOL TW. 2007. Analysis of kaolin particle film use and its application on coffee. *Hortscience* 42:1605-1608.

SWISHER, M. 1999. Manual para los estudios de campo, Módulo 1. La Ecología de la Parcela. Universidad de la Florida. 84p.

TUBIELO, F.N., M DONATELLI, C., ROSENZWEING and C.O. Stockle. 2000. EFFECT OF CLIMATE CHANGE and elevated CO₂ on cropping systems: model prediction at two

Italian location. *European journal of agronomy*, 12: 179-189.

THINGNAES, E.; TORRE,S.; ERNSSEN,A.; MOE, R. 2003. Day and night temperature responses in Arabidopsis: Effect on gibberellin and auxin content, cell size, morphology and flowering time. *Annals of Botany*.92:601-612.

VAAST P, VAN KANTEN R, SILES P, ANGRAND J, AGUILAR A. 2007. Biophysical interactions between timber trees and Arabica coffee in suboptimal conditions of Central America. In: Shibu J, Gordon A (eds) *Advances in agroforestry: toward agroforestry design: an ecological approach*. Dordrecht, Springer, pp. 135–148.

VAAST P., VAN KANTEN R., SILES P., DZIB B., FRANCK N., HARMAND J.M. AND GENARD M. 2006. Shade: a key factor for coffee sustainability and quality. In: *Proceedings of the 20th ASIC Colloquium (Bangalore, India)*. ASIC, Paris, France, pp. 887–896.

VAN KANTEN R.F. 2003. Competitive interactions between *Coffea arabica* L. And fast growing timber shade trees. Doctoral Thesis, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 141p.

VALLADARES., F.; ARANDA., I.; GÓMEZ S., D. 2005. La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. *In: Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid, Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC, p. 335 – 369.

VILLALOBOS, A. 2004. An analysis of the Latin America supply of sustainable coffee. Executive summary. Alajuela, Centro de Inteligencia de Mercados - CIMS. p. 12.

WOODWARD, FI. 1998. Do plants really need stomata? *Journal of Experimental Botany*, 49: 471-480.

WOODWARD, FI. And KELLY, CK., 1995. The influence of CO₂ concentration on stomatal density. *New Phytologist*, 131: 311-327.

WOODWARD, FI. 1987. Stomatal numbers are sensitive to increase in CO₂ from pre-industrial levels. *Nature*, 327: 617-618.

WRIGLEY G. 1988. Coffee. Tropical Agriculture Series. Longman Scientific & Technical, Singapore.