

COMPORTAMIENTO ECOFISIOLÓGICO DE CAFÉ VARIEDAD CASTILLO BAJO
TRES NIVELES DE SOMBRÍO EN EL MUNICIPIO DE TIBACUY,
CUNDINAMARCA.

ZAIRA KATERINE NIETO ABRIL

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES –U.D.C.A
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL
BOGOTÁ
2016

COMPORTAMIENTO ECOFISIOLÓGICO DE CAFÉ VARIEDAD CASTILLO BAJO
TRES NIVELES DE SOMBRÍO EN EL MUNICIPIO DE TIBACUY,
CUNDINAMARCA.

ZAIRA KATERINE NIETO ABRIL

DOCUMENTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN AGROFORESTERÍA TROPICAL.

DIRECTORA

PIEDAD CECILIA ZAPATA ARANGO

AGROZOOTECNISTA, MSc.

CODIRECTOR

HERNÁN ANDRADE CASTAÑEDA

Ingeniero Agrónomo Ph.D

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS Y AMBIENTALES -UDCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

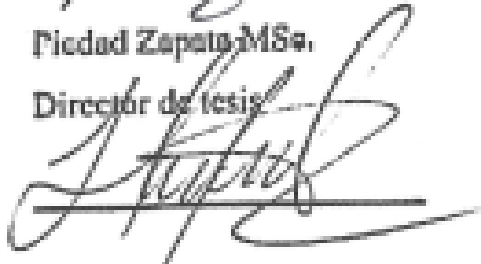
MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

BOGOTÁ

2016

CONSTANCIA APROBATORIA

El presente documento ha sido debidamente revisado y evaluado de acuerdo a las normas establecidas por la Universidad, para validar el rigor y validez científica de los planteamientos y conclusiones en reflejadas, requisito parcial para optar al título de:

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical**EDGAR MARTÍNEZ GRANJA, Ph.D.****Decano de la Facultad****Piedad Zapata, MSc.****Director de tesis****Hernán Jair Andrade, Ph.D.****Co-director de tesis****Gladis Romero, Ph.D.****Jurado****Diana Rosero, MSc.****Jurado**

Dedicatoria

En primer lugar a Dios porque sin la ayuda de él nada hubiese sido posible.

A mi madre que desde el cielo siempre está conmigo y a mi padre por apoyarme incondicionalmente.

A mi hija y a mi esposo porque ellos son mi motivación para salir adelante.

A mis hermanos porque son personas ejemplares.

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Piedad Zapata directora de mi investigación, a la cual debo la mayor parte de mi tesis, ya que gracias a su colaboración no hubiese sido posible sacar este trabajo adelante.

Al Dr. Hernán Andrade por su gran ayuda e interés por esta investigación.

A la Dra. Gladys Romero y la Ingeniera Diana Rosero por sus valiosos aportes y sugerencias para mi trabajo.

A Diana Sánchez y a Daniel Díaz por su colaboración en la fase de campo.

A los caficultores que nos permitieron desarrollar el presente estudio en su fincas.

A mis compañeros de la cohorte y a los docentes que nos orientaron durante este proceso.

Al Convenio 009 de 2014 entre el departamento de Cundinamarca y la Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas U.D.C.A a través del cual se me otorgó la beca para desarrollar la maestría.

A Cecilia Vargas por su apoyo y por enseñarme todo lo que se debe saber en esta nueva etapa de mi vida.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| LISTA DE TABLAS | viii |
| LISTA DE ABREVIACIONES Y SIGLAS | xi |
| LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA..... | xii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| RESUMEN | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| 1. PROBLEMA..... | 5 |
| 2. JUSTIFICACIÓN..... | 7 |
| 3. OBJETIVOS..... | 9 |
| 3.1. General..... | 9 |
| 3.2. Objetivos Específicos | 9 |
| 3.3. Hipótesis | 9 |
| 4. MARCO DE REFERENCIA | 10 |
| 5. METODOLOGÍA | 24 |
| 5.1. Localización del estudio | 24 |
| 5.2. Selección y características de las unidades de muestreo | 25 |
| 5.4. Medición de las variables ecofisiológicas | 27 |
| 5.5. Métodos estadísticos | 29 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 31 |
| 6.1. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y EL BRILLO SOLAR..... | 31 |
| Precipitación | 31 |
| Brillo solar..... | 33 |
| 6.2. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DE LA HOJA | 35 |

| | |
|---|----|
| 6.3. COMPORTAMIENTO DE VARIABLES ECOFISIOLÓGICAS BAJO TRES NIVELES DE SOMBRÍO | 35 |
| 6.3.1. PARI | 35 |
| 6.3.2. Eficiencia en el uso de la radiación o rendimiento cuántico | 38 |
| 6.3.4. Asimilación neta de CO ₂ | 41 |
| 6.3.5. Impacto de la radiación incidente sobre la asimilación neta de CO ₂ | 42 |
| 6.3.6. Déficit de presión de vapor..... | 44 |
| 6.3.7. Transpiración | 45 |
| 6.3.8. Eficiencia de uso del agua | 47 |
| 6.3.9. Relación entre las variables ecofisiológicas, periodos de muestreo, niveles de sombrío | 48 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 52 |
| 8. REFERENCIAS | 54 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Consecuencias del cambio climático en Colombia | 10 |
| Tabla 2: Indicadores del Municipio de Tibacuy (Fuente: Secretaria de Planeación de Cundinamarca. Oficina de Sistemas de Información, Análisis y Estadísticas 2013) | 25 |
| Tabla 3: Fincas seleccionadas para el presente estudio (Fuente: Convenio 009 de 2014)... | 26 |
| Tabla 4: Abundancia de árboles y musáceas en fincas cafeteras de Tibacuy..... | 27 |
| Tabla 5: Datos históricos de precipitación y brillo solar, estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. FUENTE: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé", Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia. Septiembre de 2015..... | 31 |
| Tabla 6: Promedio de temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de la hoja durante los meses de muestreo | 35 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa veredal del municipio de Tibacuy y ubicación de fincas seleccionadas para el estudio. Fuente: Convenio No. SC Tel 009 de 2014. | 24 |
| Figura 2: Ilustración de toma de muestras en las plantas de café. (EB) Estrato Bajo, (EM) Estrato Medio, (EB) Estrato Bajo, (H1) Hoja uno, Hoja dos y Hoja Tres. Fuente: Autor.. | 28 |
| Figura 3: Consola de CIRAS 3 parte frontal: Fuente: PP Systems 2013 | 29 |
| Figura 4: Precipitación promedio por cada periodo de muestreo vs histórico estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. Fuente Federación Nacional de Cafetero de Colombia (2015)..... | 32 |
| Figura 5. Comportamiento de la precipitación promedio diaria durante cada periodo de muestreo estación agroclimática La Granja, municipio de Tibacuy. | 32 |
| Figura 6. Brillo solar promedio por cada periodo de muestreo vs promedio histórico, estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. Fuente: Federación Nacional de Cafetero de Colombia (2015) | 33 |
| Figura 7. Comportamiento del brillo solar promedio diario por muestreo (h/día) | 34 |
| Figura 8. Radiación incidente ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P<0.05$). | 36 |
| Figura 9. Rendimiento cuántico ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol fotones}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P<0.05$). | 38 |
| Figura 10. Conductancia estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P<0.05$). | 39 |

- Figura 11. Asimilación neta de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) durante los tres periodos de muestreo bajo tres niveles de sombrero: SB (sombra baja), SM (sombra media), SA (sombra alta). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas. 41
- Figura 12. Impacto de la radiación incidente ($\mu\text{mol fotones m}^2/\text{s}$) sobre la asimilación neta de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) en plantas de café en tres periodos de muestreo S (seco), T (transición), LI (lluvioso), en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. 43
- Figura 13. Déficit de presión de vapor DPV (kPa) bajo tres niveles de sombrero: SB (sombra baja), SM (sombra media), SA (sombra alta). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas. 44
- Figura 14. Déficit de presión de vapor DPV (KPa) durante los tres periodos de muestreo, Lluvioso (LI), transición (T) y seco (S). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$). 44
- Figura 15: Transpiración ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$). 46
- Figura 16. Eficiencia de uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$). 47
- Figura 17: Relación entre las variables ecofisiológicas, periodos de muestreo, niveles de sombrero, SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja) en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. 49

LISTA DE ABREVIACIONES Y SIGLAS

A: Asimilación Neta.

CC: Cambio Climático

CO₂: Dióxido de carbono

DPV: Déficit de Presión de Vapor

GEI: Gases Efecto Invernadero

gs: Conductancia estomática

Ll: Lluvioso

PARI: Radiación fotosintéticamente activa incidente

RFA: Radiación Fotosintéticamente Activa

RC: Rendimiento cuántica o uso eficiente de la radiación.

S: Seco

SA: Sombra Alta

SAF: Sistemas agroforestales

SM: Sombra media

SB: Sombra Baja

T: Transición

WUE: Eficiencia en el uso del agua

HR. Humedad relativa

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

m²: Metro cuadrado

μmolesCO₂: micro moles de dióxido de carbono

μmolesH₂O: micro moles de agua

s. Segundo

°C: Grados Celsius

h: Horas

ha: Hectárea

kPa: Kilo pascales

Mm: milímetros

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que ha ocurrido en el planeta desde su origen, este proceso es evidenciado a través de las eras geológicas que dieron origen y permitieron la evolución de las especies en la tierra; sin embargo, las aceleradas fluctuaciones en el clima que presenciamos en la actualidad son una problemática causada principalmente por la actividad humana, especialmente por la emisión de gases efecto invernadero GEI y en mayor proporción el CO₂ que tiene como consecuencia el calentamiento global (Rodríguez, 2009).

Una de las principales alternativas para la adaptación y mitigación del cambio climático es el control en el flujo del CO₂ mediante la implementación de los sistemas agroforestales, ya que los árboles juegan un papel importante dentro del ciclo del carbono. Las especies forestales se encargan de transformar el CO₂ en carbono orgánico y almacenarlo como madera, materia orgánica, las raíces y el suelo, por medio de un proceso que ocurre con la intervención de las enzimas que actúan en la fijación y reducción de CO₂ produciendo los carbohidratos, que son la fuente de energía para llevar a cabo sus procesos fisiológicos (Sáenz, 2012). A su vez, los sistemas agroforestales cafeteros presentan un potencial apreciable para retener el carbono de la atmósfera, además permiten disminuir la presión de los bosques por obtención de madera para las actividades cotidianas de la población rural, así como también generan ingresos en diferentes temporalidades a los caficultores por la obtención de materias primas y alimentos de las especies arbóreas asociadas (Farfán, 2014).

La sombra que generan los árboles asociados a los cafetales tiene la capacidad de regular las condiciones climáticas y en niveles adecuadas favorece los procesos fisiológicos de los cafetos teniendo como resultado la optimización de los recursos, el aumento de la producción, y la prolongación de la longevidad de las plantas de café, con rendimientos sostenidos (Arcila et al. 2007).

Sin embargo, cuando las densidades de las especies arbóreas son muy altas pueden generar competencia por agua, luz y nutrientes con las plantas de café, generando una disminución de su rendimiento (Beer, 1987). Los factores edáficos y climáticos de cada zona, junto con las características de las especies forestales, juegan un papel muy importante sobre el cultivo de café bajo sombra y su manejo; por lo tanto, en esta investigación se evaluó el comportamiento ecofisiológico de café variedad Castillo bajo tres niveles de sombrero en el municipio de Tibacuy, con el fin de identificar cuál de los sistemas evaluados es el más eficiente.

Este trabajo se realizó en el marco del Convenio Especial de Cooperación 009 de 2014 entre el departamento de Cundinamarca-Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación y la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, donde participaron como aliados la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR y la Corporación Latinoamericana Misión Rural.

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el comportamiento ecofisiológico del café variedad Castillo bajo tres condiciones de sombra: Alta (SA), Media (SM) y Baja (SB) en el municipio de Tibacuy, departamento de Cundinamarca. Se seleccionaron cinco fincas por condición de sombra, con cafetales en edades entre 4 y 8 años. En cada predio se empleó una parcela de muestreo de 1000 m², en la cual se realizaron tres muestreos en el año 2015: enero correspondiente al periodo lluvioso (LI), junio que correspondió a la época de transición (T) y julio o época seca (S). En cada parcela de muestreo se tomaron tres hojas en tres plantas de café que presenten buenas condiciones fisiológicas y fitosanitarias, que reflejaban la condición del sistema productivo. Las variables medidas fueron: radiación incidente (PARI), déficit de vapor de agua (DPV), conductancia estomática (gs), transpiración (E), asimilación neta (A), eficiencia del uso del agua (WUE) y eficiencia de uso de la radiación o rendimiento cuántico (RC), esto se realizó empleando un sistema de fotosíntesis portable CIRAS-3. En las variables ecofisiológicas se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la PARI entre niveles de sombrero, con mayor radiación en la condición SB (410,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), seguido de SM (238,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) y sombra alta, (93,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). En la eficiencia del uso de la radiación no se registraron diferencias significativas entre niveles de sombrero ($p > 0,05$), donde el valor promedio de la eficiencia para las tres condiciones fue de (0,02 $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol fotones}$). La gs presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre niveles de sombrero, siendo mayor en las fincas de SM (136,5 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$). Se registraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los niveles de sombrero en cuanto a la asimilación neta, donde el mayor valor se presentó en las fincas de SB (4,6 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) y SM (4,3 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) frente a las fincas de SA (1,8 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$). El DPV fue mayor ($p < 0,05$) en las condiciones de SB y SA (1,7 kPa) y menor para la condición de SM (1,5 kPa). De acuerdo a los datos obtenidos se evidencia que para este estudio los altos niveles de sombra (47 - 70%) es una de las principales limitantes que presentaron las plantas de café para llevar a cabo procesos fisiológicos mientras que el sistema de SM demostró ser el más eficiente con un rango de 21 y 41% de sombra.

Palabras clave: café con sombrero, radiación fotosintéticamente activa, asimilación neta de CO₂, uso eficiente de la radiación, uso eficiente del agua.

ABSTRACT

In this research the ecophysiological behavior of coffee variety Castillo was evaluated under three conditions of shade, high (SA), medium (SM) and low (SB) in Tibacuy town department of Cundinamarca. Selecting five farms by type of shade, coffee plantations aged between 4 and 8 years. In each place it was used a plot of sample of 1.000m², in which three samples were taken in 2015: January for the rainy season (L1), June which corresponded to the period of transition (T) and July or dry season (S). In each sample three plants were taken at random that have good physiological conditions and phytosanitary that reflect the condition of productive system. The variables measurements were: incident radiation (PARi), stomatal conductance (gs), vapor pressure deficit (VPD), transpiration (E), net assimilation (A), efficiency of water use (WUE) and efficiency in radiation use or quantum yield (RC), this was performed out using a portable photosynthesis system CIRAS-3. In the ecophysiological variables were found significant differences (p<0.05) in the PARi among shadow levels, with most radiation in the condition SB (410.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), followed by SM (238.3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) and SA (93.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). In the use efficiency of the radiation were not registered significant differences (p>0.05) among shade levels, where the average level of the efficiency for the three conditions was (0.02 $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol photons}$). La gs showed significant differences (p<0.05), among shade levels, being most in the conditions of SM (136.5 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$). Were registered significant differences (p<0.05) among the shade levels in the whole net assimilation, were most value was registered in the farms of SB (4.6 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$), and SM (4.3 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) being most in the conditions of SA (1.8 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$), wish shade minor value. The DPV was higher (p <0.05) in the conditions of SB and SA (1.7 kPa) and less for the condition of SM (1.5 kPa), According to the data obtained it is evident that for this study the high levels of shade (47-70 %) is one of the main constraints that had coffee plants to carry out physiological processes, while the system SM proved to be the more efficient with a range of 21 and 41% shade.

Key words: coffee with shade, radiation photosynthetically active, assimilation of CO₂, efficiency in radiation use, efficiency in water use.

1. PROBLEMA

Una de las problemáticas ambientales preponderantes en la actualidad es el fenómeno del cambio climático, el cual se ha desencadenado por causas naturales y en mayor medida acciones antrópicas, principalmente, el cambio del uso del suelo, la quema de combustibles fósiles y los procesos de pérdida de áreas boscosas, ya sea por tala, quemas indiscriminadas o ampliación de la frontera agrícola, actividades que generan emisiones de gases de efecto invernadero (IPPC, 2001).

El CO₂ atmosférico es una de las materias primas empleada por las plantas para llevar a cabo la fotosíntesis, en este proceso, se sintetizan compuestos que son regulados por la radiación solar, la temperatura, el agua y los nutrientes presentes en el suelo, estos compuestos aportan en la conformación de los tejidos, mantener las reservas de carbohidratos, que son necesarios para el crecimiento de las plantas (García et al, 2011). Frente al cambio climático es importante conocer el potencial de asimilación de CO₂, uso de la radicación, uso del agua que tienen los cultivos bajo diferentes condiciones geográficas y de manejo, pues esto da luces sobre su potencial de adaptación y mitigación.

En los países en vía de desarrollo se proyecta un grado significativo de afectación frente a los efectos del cambio climático, debido a su bajo nivel de adaptabilidad. Por tal razón se crean estrategias para reducir el impacto de las fluctuaciones del clima, como la propuesta en la convención macro de naciones unidad para el cambio climático (CMNUCC), que consiste en disminuir las fuentes de gases efecto invernadero (GEI), y a su vez incrementar los sumideros de carbono, mediante la implementación de la agroforestería y el cambio en el uso del suelo (Andrade, et al. 2014).

El cultivo de café en Colombia se encuentra establecido en un área de 920.000 ha, de las cuales la gran mayoría están sembradas a plena exposición solar, aproximadamente un 50%. Aun así, existen plantaciones establecidas bajo diferentes tipos y cantidades de cobertura arbórea, 304.630 ha (33%) bajo condiciones de semisombra y 154.956 ha (15%) con sombrío (Farfán, 2012). Sin embargo, los niveles de sombra de algunos cafetales no

son los más adecuadas para las condiciones edáficas y climáticas de la zona donde se encuentran establecidos, así lo demuestran algunas investigaciones como la desarrollada por Castillo y López (1966), donde se evaluó la influencia de cuatro condiciones de sombrero (25, 50, 75 y 100%) sobre plantas de café variedad Borbón, encontrando una relación negativa entre el nivel de sombra y la cantidad de nudos por rama, el número de hojas, glomérulos con flores y la cantidad de flores por nudo.

Los avances en la investigación sobre el comportamiento ecofisiológico en *Coffea arabica* se están implementando actualmente en Colombia, más aún, si se pretende incentivar el establecimiento de los SAF asociados al cultivo de café. Por lo tanto, es fundamental generar estudios en cada una de las zonas de importancia para la caficultura, como el municipio de Tibacuy el cual no cuenta con estudios que cuantifiquen las variables fisiológicas y permitan comprender como es la interacción entre la fisiología del café variedad Castillo, las condiciones ambientales y el dosel de sombra de las especies arbóreas asociadas a su cultivo en diferentes temporalidades, para lograr identificar los porcentajes de sombrero requeridos para esta región, así que la pregunta principal de la investigación es: ¿Existe relación entre el nivel de sombrero, las variables ecofisiológicas del café variedad Castillo y el periodo de muestreo en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca, Colombia?

2. JUSTIFICACIÓN

En los SAF cafeteros se articulan prácticas de manejo de los cafetales con el establecimiento de especies forestales, con el propósito de brindar una alternativa viable de producción, dadas sus facilidades para obtener productos en diferentes temporalidades. Esta cualidad permite generar ingresos de manera constante y en algunos casos simultáneamente, su implementación puede aportar favorablemente a la conservación del suelo, del agua y de la biodiversidad, el sostenimiento de las familias campesinas, así como también ofrecer servicios ambientales para contribuir a la adaptación y mitigación del cambio climático.

Según CENICAFÉ (2013), la producción en el cultivo de café se encuentra influenciada principalmente por la relación de factores genéticos, ambientales y las prácticas de manejo. Dentro de los factores ambientales se encuentran la radiación, el fotoperiodo, la temperatura, la disponibilidad hídrica y el tipo de suelo. Considerando el rango de adaptación altitudinal del café en nuestro país (1.000 y 2.000 m) es de gran importancia conocer la interacción entre estos factores en diferentes temporalidades en cada zona de importancia productiva. Los resultados favorecerán la implementación de prácticas de manejo entre ellas los SAF que permitan optimizar el uso de los recursos, buscando un equilibrio entre productividad y conservación ambiental y que contribuyan a la mitigación y adaptación frente al cambio climático de los sistemas cafeteros.

Este estudio se desarrolló en cafetales (variedad castillo), con tres niveles de sombrío: SA, SM y SB; la variedad Castillo es un material genéticamente mejorado, obtenido a partir de cruce entre la variedad Caturra y el híbrido Timor. Este material se caracteriza por su resistencia a la roya del cafeto cuyo agente causal *Hemileia vastatrix* la cual es la enfermedad más limitante de este cultivo, así como también cierto grado de tolerancia a la enfermedad de las cerezas del café, causadas por el patógeno *Colletotrichum kahawae*. Además, la variedad Castillo posee ciertos atributos agronómicos como calidad en taza, disminución de defectos en grano, el manejo agronómico como la disminución de la aplicación de agroquímicos para el control de enfermedades, facilitando la producción

limpia, que son similares a los de las variedades empleadas tradicionalmente en Colombia (Alvarado, Posada y Cortina, 2005).

Son pocos los estudios sobre la variedad Castillo en Colombia y específicamente para la zona de estudio no se cuenta con investigaciones que permitan evaluar el comportamiento de esta variedad bajo diferentes niveles de sombrero. Este estudio aportará nuevo conocimiento en este sentido, específicamente en variables como la asimilación de CO₂, transpiración, uso de la radiación, resultados que son insumos importantes para evaluar la adaptación de la variedad Castillo en el municipio de Tibacuy y para determinar acciones de manejo que contribuyan a la sostenibilidad de los sistemas de producción de café en la zona.

3. OBJETIVOS

3.1. General

Evaluar el comportamiento de las variables ecofisiológicas de café variedad castillo bajo tres niveles de sombrero en el municipio de Tibacuy Cundinamarca.

3.2. Objetivos Específicos

- Estimar la respuesta ecofisiológica del café Castillo bajo tres niveles de sombra (sombra alta, sombra media y sombra baja) en tres periodos de muestreo (seco, transición y lluvioso)
- Analizar la relación entre la precipitación y brillo solar sobre la respuesta ecofisiológica de café variedad castillo bajo tres niveles de sombrero en Tibacuy, Cundinamarca.

3.3. Hipótesis

A medida que aumenta la sombra disminuye la radiación disponible para el café y la asimilación de CO₂.

Existe una relación directamente proporcional entre la conductancia estomática, la transpiración y la asimilación de CO₂.

El aumento en la precipitación y brillo solar favorece la asimilación de CO₂ y la eficiencia en el uso del agua.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. Cambio climático

Este fenómeno de alteración en el clima tiene una afectación mundial. En el caso particular de Colombia, se presenta una alta vulnerabilidad debido a la distribución de la población en las zonas montañosas y costeras, además de la alta recurrencia de eventos extremos y la creciente incidencia de fenómenos naturales asociados al clima (PNUD, 2010). El escenario del país se enmarca en un fuerte conflicto social, grandes inequidades regionales y una gran brecha social, dando como resultado un porcentaje significativo de la población nacional, principalmente rural, en condiciones de pobreza y pobreza extrema, amenazada por los efectos del cambio climático (IDEAM, 2010).

De acuerdo con el PNUD (2010), se espera que para 2070 la temperatura media del país aumente entre 2 y 4°C, reduciéndose la precipitación en un 30%, afectando a toda la nación, principalmente a las poblaciones rurales y los grupos marginales. Estos se verán sometidos a una disminución de la calidad de vida, escasez de alimentos y recursos naturales básicos, desplazamiento y migración.

Las consecuencias esperadas de estas variaciones climáticas a nivel nacional son:

Tabla 1: Consecuencias del cambio climático en Colombia

| ÁMBITO | DESCRIPCIÓN |
|----------------------------|--|
| Salud | Incremento en las enfermedades transmitidas por vectores (malaria, dengue, entre otras). |
| Sector Agropecuario | Aridización, erosión del suelo, desertificación, cambios en el régimen hídrico (inundaciones, vendavales, granizadas, etc.), afectando directamente la producción agrícola. |
| Recursos Hídricos | Incremento en la escorrentía en las regiones costeras, llanos orientales y zonas inundables. Contrariamente en la región andina se espera una disminución de las precipitaciones y nivel de los cauces, causando problemas de suministro de agua, desabastecimiento y déficit en los embalses. |
| Sistemas Costeros | Elevaciones en el nivel del mar e inundaciones de las zonas pobladas costeras. Disminución de las fuentes de agua dulce por intrusión salina. |
| Ecosistemas | Reducción de área de paramos y nevados, afectación en los corales por incremento en la temperatura media del mar, disminución de los recursos |

| | |
|---------------------------------|---|
| | pesqueros. La afectación de las coberturas boscosas puede ser muy fuerte, sin embargo existe la incertidumbre por la resiliencia de los mismos. |
| Vivienda y Asentamientos | Mayor frecuencia de eventos extremos pone en riesgo las infraestructuras y asentamientos en las zonas de riesgo, disminuyendo la calidad de vida de las poblaciones, principalmente desplazados y pobres. |

Fuente: Modificado de PNUD (2010).

El pasado mes de diciembre del 2015 se llevó a cabo la Convención Marco sobre el Cambio Climático en París (COP21), en donde se realizaron una serie de anuncios e iniciativas que se enfocaron en la ayuda a los países vulnerables y la destinación de recursos económicos provenientes de los combustibles fósiles para este fin. Una de las iniciativas pretende fomentar la construcción de planes que permitan disminuir las emisiones de GEI en los países en desarrollo. Otra iniciativa fue anticipar, absorber, remodelar, que consiste en reforzar la resiliencia al clima de las personas que viven zonas costeras. Además en materia de energías renovables, países como India y Francia lanzaron la estrategia alianza solar internacional, que consiste en promover el uso de la energía solar en países en desarrollo, agregado a lo anterior se incrementarían las inversiones en investigación sobre estas energías. Otra iniciativa es la de solicitar a las empresas y países fijar el precio del carbono. Por último los jefes de gobierno de los países forestales publicaron una declaración en defensa de los bosques como una de las soluciones preponderantes para la mitigación y adaptación al cambio climático (Naciones Unidas, 2016).

4.2. Sistemas agroforestales (SAF)

Los SAF, son una forma de uso de la tierra en donde leñosas perennes interactúan biológica y espacialmente en una unidad de territorio con cultivos y/o animales, mediante arreglos espaciales y temporales (Nair, 1993). El propósito fundamental de estos sistemas es optimizar la producción respetando el principio de la sostenibilidad, constituyéndose como una alternativa viable de producción que puede ser empleado por la población rural (López, 2010). De acuerdo con Kopsell y Jiménez (2001), es fundamental que estos sistemas posean tres atributos: la productividad, la adaptabilidad y la sostenibilidad. Esto se traduce en que el sistema produzca los bienes que demanda el productor, en forma indefinida, con

la flexibilidad para adaptarse a los límites que se van generando en el entorno, bien sea la mano de obra, los recursos económicos, los insumos o la producción final.

Según FAO (2012), los SAF son una estrategia de adaptación para la mitigación frente a las causas y efectos del cambio climático de las poblaciones vulnerables, ya que presentan diversos beneficios, tal como: contribución al mejoramiento de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como la protección del mismo frente a los procesos erosivos. Además, estos sistemas aumentan la disponibilidad de productos maderables y alimento para humanos y animales, con su implementación se puede reducir el uso intensivo de productos de síntesis química para el control de plagas, enfermedades y arvenses o la fertilización de los cultivos. Adicionalmente, los SAF ofrecen servicios ambientales como la fijación de nitrógeno atmosférico, mejoramiento del microclima de la zona donde se encuentra establecido, producción de oxígeno, refugio silvestre, y la fijación y almacenamiento de carbono.

Según el IGAC y Corpoica (2002), del área total del territorio nacional el 19.28% presenta potencial agroforestal, de esta área el 3% tiene vocación silvopastoril, 6% agrosilvopastoril y 10% silvoagrícola. Aun cuando los SAF no son los más destacados en el almacenamiento de carbono comparado con los bosques primarios o los plantados, su potencial para la regulación de los gases de efecto invernadero es superior que el de los monocultivos o las zonas dedicadas a la ganadería extensiva (Kandji et al. 2006).

De acuerdo con el CIAT (2009), los SAF y los bosques secundarios funcionan como sumideros de gases, mientras que los sistemas de tala y quema emitieron metano, en una investigación en Lempira, Honduras. En Colombia, persiste el conflicto por el uso de la tierra, por tal razón los SAF presentan un enfoque mayormente local, cuyo propósito es mejorar la calidad de vida del agricultor según sus objetivos, en menor medida existen SAF con enfoque nacional, como la producción de madera, café, caucho, frutales, cacao, entre otros bienes exportables, los cuales se caracterizan por predecir las necesidades de un país a nivel interno.

El empleo de los SAF ofrece varias ventajas en comparación con el establecimiento de monocultivos o ganadería extensiva, especialmente en lo referente a los productos a obtener. La combinación de estos elementos permite incrementar su número, reduciendo los periodos de producción y por ende, de ingresos económicos al sistema. En adición, son numerosas las ventajas comparativas del establecimiento, diseño y manejo de las coberturas vegetales en asociación con pasturas: incremento en la materia orgánica del suelo, fijación de nitrógeno atmosférico, disminución en la compactación el suelo y modificaciones microclimáticas (Farfán, 2012).

4.2.1. Clasificación de los sistemas agroforestales

Para comprender la clasificación de los SAF es necesario identificar las interacciones que ocurren entre las especies que conforman el sistema, las cuales son reguladas por las condiciones ambientales bajo un principio de causa y efecto, donde la presencia de un componente como por ejemplo una planta cambia las condiciones de sus vecinas. Existen relaciones positivas como el mutualismo (+,+), en el cual se benefician los todas las partes que se encuentran interactuando, otro tipo de interacción es el conocido como el comensalismo en el cual un individuo se beneficia sin causar ningún efecto sobre el otro (+,0), las relaciones donde un individuo un individuo es afecta y el otro se beneficia (+,-) se conoce como depredación y cuando ninguna resulta beneficiada por la interacción se llama competencia (-,-). Sin embargo, los SAF tienen como objetivo crear un balance favorable entre los diferentes componentes, disminuyendo todas aquellas interacciones que puedan resultar negativas (Jiménez y Vargas, 1998).

Nair (1993), indica que los principales criterios para la clasificación de los SAF son la estructura, la función, la naturaleza socioeconómica y ecológica. A continuación se describen brevemente.

Base estructural: Hace referencia a la disposición de los componentes en el espacio, el componente leñoso, temporal y estratificación de los mismos. Entre los cuales tenemos a los que se encuentran basados en la naturaleza de sus componentes como los sistemas

agrosilvícolas, sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoril. Además integran este grupo los que se encuentran basados en el arreglo de sus componentes, dentro de los cuales se hallan los arreglos espaciales, como las plantaciones en línea, los huertos caseros. Así como también hacen parte de este grupo los arreglos temporales, como el coincidente, el concomitante, intermitente, interpolado, sobre puesto y el separado.

Base funcional: enfocada principalmente en dos atributos, producción y protección, en este sentido se busca que los SAF posean estos dos atributos, satisfaciendo las necesidades básicas y además propenda por el cuidado del medio ambiente.

Base ecológica: que hace referencia al grado de adaptabilidad de un sistema a determinadas condiciones ecológicas.

Base socioeconómica: se refieren a las escala de producción, nivel de inversión o manejo técnico.

Según Van et al., (2000), el arreglo es uno de los criterios de clasificación a nivel estructural de los SAF, y se define como la disposición de los componentes en el tiempo o secuencialidad y en el espacio. Es decir la forma como se encuentran situados estos componentes en el espacio físico del sistema. Teniendo en cuenta lo anterior los SAF se pueden clasificar mediante este criterio en dos tipos.

Zonal: cuando los componentes del sistema se encuentran dispuestos de forma geométrica dentro del lote.

Mixto: en este caso los componentes se encuentran de forma irregular dentro del área de intervención.

4.2.2. Fenología del café

El café es un arbusto perenne que presenta un ciclo de vida en condiciones comerciales de 20-25 años. En plantas a libre exposición los picos de producción son alcanzados entre los

6 y 8 años de edad. Los cafetos presentan tres fases durante su ciclo, la primera es el ciclo vegetativo, caracterizada por la formación de las raíces, ramas, nudos y hojas, la segunda fase es la reproductiva, en la cual ocurre la formación y desarrollo de flores y frutos, y la tercera es la fase de senescencia en donde la planta envejece (Dedecca, 1957).

En regiones ecuatoriales como Colombia el clima presenta un comportamiento bimodal, es decir que ocurren dos estaciones secas y dos húmedas en el año, en esta zona el cultivo de café tiene dos periodos de floración, fructificación y crecimiento de rebrotes (Cannell, 1985). Sin embargo, en la zona cafetera de Colombia se presenta una competencia entre el crecimiento vegetativo y reproductivo durante el ciclo de vida de la planta de café, esta situación origina competencia por los asimilados entre los órganos de las plantas lo que se atribuye a que en las regiones ecuatoriales no es definida la alternancia entre periodos secos y húmedos (Arcila et al. 2007).

En la zona centro del país ocurre un mayor crecimiento de ramas y tallos en el primer semestre del año en los meses de marzo – abril y en el segundo semestre en septiembre – octubre; la floración ocurre en enero – marzo y agosto – septiembre y la cosecha en el mes de septiembre-diciembre y abril-junio (Cenicafé, 2001).

Según Arcila et al. (2007), en la fase vegetativa que ocurre entre la germinación hasta la primera floración se encuentra influenciada por la radiación solar, por ejemplo, con radiaciones altas las plantas son más bajas y más productivas, en condiciones de sombra las plantas son más altas y menos productivas, otros factores que afectan esta fase son la disponibilidad de agua y nutrientes.

La floración ocurre en cinco etapas, inducción, diferenciación, desarrollo, latencia y antesis. En la etapa de inducción la planta requiere de fotoperiodos cortos, no mayores a 13,5 h/día y temperaturas inferiores a los 28°C. La fase de desarrollo es controlado por la disponibilidad hídrica y energética. La de latencia es inducida por el estrés hídrico y altas temperaturas, esta etapa es superada cuando inician las lluvias y se reduce la temperatura,

de esta forma ocurre la etapa de antesis o apertura de la flor que tiene una duración promedio de tres días (Camayo et al. 2003).

En el desarrollo del fruto la disponibilidad de agua es una de las principales limitantes, ya que al presentarse un déficit hídrico durante esta fase, se puede afectar tanto el tamaño como el llenado, en caso de generarse exceso de agua el efecto es indirecto ya que esta condición favorece la presencia de enfermedades o la caída de los mismos (Barros et al. 1978; Castillo y López, 1966).

4.2.3. Cultivo de café bajo sombra

En los SAF con café se articulan prácticas de manejo de los cafetales con el establecimiento de especies forestales, las especies asociadas al cultivo deben contar con ciertas características deseables, tal como: adaptarse a los climas cafeteros, leguminosas de crecimiento rápido, el follaje debe permitir la entrada de luz, debe ser inmune a plagas y enfermedades que puedan atacar los cafetos y raíces profundas. Las densidades de siembra empleados para este sistema son: 9000 plantas de café variedad castillo y 70 - 80 individuos arbóreos por hectárea (Farfán, 2012).

En los sistemas agroforestales cafeteros la presencia de individuos arbóreos aportan beneficios como la optimización del agua, mantienen la fertilidad de suelo, disminuyen la erosión, participan de forma activa en el ciclaje de nutrientes, aporte de materia orgánica, aumentan las poblaciones de plantas epífitas, así como también promueven la diversidad en la fauna (Beer, 1987).

El café es una planta originaria de las zonas de bosque húmedo y tropical de África, por tal motivo cualquiera de sus variedades puede plantarse bajo condiciones de sombra, algunos estudios como los desarrollados por Botero et al. (2004), demostraron que la producción de café bajo sombra es menor que en condiciones de plena exposición solar. Sin embargo, si se establece con la especie y densidad adecuadas puede alcanzar la misma producción que el café a libre exposición.

El porcentaje de sombra requerido para el cultivo de café en el municipio de Tibacuy de acuerdo a su ubicación geográfica ($04^{\circ}22'N$ y $74^{\circ}26'O$), altitud promedio (1.538m) y brillo solar anual (1.485 h) es de aproximadamente un 29%, (Cenicafé, 2009). Cuando el nivel de sombra del cafetal es superior al apropiado, se presenta una competencia por radiación, nutrientes y humedad en el suelo, mientras que cuando el sombrero es menor al requerido, en las plantas se presenta aumento de temperatura en la hojas, cierre estomático y reducción de la fotosíntesis (Arcila et al. 2007).

Angrand (2002) que evaluó la influencia del dosel de sombra de tres especies, frente a un cafetal testigo a pleno sol, en la floración, y el desarrollo vegetativo en Costa Rica, encontrando que el desarrollo vegetativo fue mayor en los SAF comparado con el tratamiento testigo, efecto que atribuye a la disminución de la PAR disponible (55 – 70%), además encontró que aunque la floración se adelantó, así como también la cantidad de flores por nudo fue mayor en los cafetales a pleno sol, la tasa de caída de frutos registradas en este sistema fue superior en los cafetales a pleno sol evaluados (35,7%), frente a la tasa promedio de caída de frutos en los SAF (19,43%). En cuanto a los niveles de PAR, la condición de pleno sol fue muy superior el punto de saturación del café ($>900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en los tres muestreos realizados, mientras que en los SAF presentaron valores cercanos al punto de saturación para esta especie (250-400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

4.2.4. Café variedad castillo

Uno de los productos agrícolas más representativos a nivel nacional es el café con un aporte del 24% al producto interno bruto (PIB) del sector agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca (DANE, 2013). El cultivo de café en Cundinamarca es una de las principales actividades productivas del sector agropecuario; para el año 2013 empleó el 24% del área destinada para la agricultura, distribuida en 63 municipios en el departamento, de las cuales se benefician cerca de 36 mil hogares.

De la superficie total del departamento (2.421.000 ha), 59.367 ha son cultivadas en café y se encuentran distribuidas en tres variedades representativas; 27.850 ha en la variedad

Típica, 16.420 ha en variedad Colombia y 15.097 ha en Caturra (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2013). Las variedades de café más empleadas para sistemas bajo sombrío en el territorio nacional son: Colombia, Típica, Borbón y Castillo (Farfán, 2012).

Las variedades de café Castillo fueron lanzadas al mercado en el año 2005 por La Federación Nacional de Cafeteros, estos cultivares surgen a partir del cruce entre la variedad Caturra y el híbrido Timor como una alternativa para la renovación de los cafetales para el control de la roya en la nación; para el año 2012 se renovaron 234.000 ha en las cuales en el 90% de esta superficie fue empleada la variedad Castillo (Cenicafé, 2012).

Según Cenicafé (2005), son seis las variedades regionales derivadas del café Castillo (El Rosario, Naranjal, Paraguacito, La Trinidad, Pueblo Bello, Santa Bárbara). A continuación se relacionan las principales características de la variedad castillo:

- La resistencia a la roya del cafeto causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, característica obtenida a partir del mejoramiento genético del cual fue producto esta variedad.
- El manejo agronómico de la variedad Castillo no difiere mucho de otros cultivares, requiere del análisis de suelo previo a su establecimiento, para posteriormente realizar el plan de fertilización, la densidad de siembra ideal es de 5.000 plantas/ha, además se debe tener en cuenta las particularidades edafoclimáticas de cada zona. En cuanto al control de plagas y enfermedades, la implementación de este material permite disminuir la aplicación de productos de síntesis química para el control de la roya.
- Su calidad en taza es descrita por poseer acidez y aroma pronunciados, amargor y cuerpo suaves, atributos que son similares a otros cultivares representativos a nivel nacional como lo son la Típica, Caturra y Borbón.

- Otra característica es que el tamaño del grano está por encima del 80% del café supremo, por lo cual se considera rentable para el productor pues esta calidad le permite ser exportado sin ningún tipo de restricción.

4.3. Comportamiento ecofisiológico del café

Entre los diversos estudios para caracterizar el comportamiento de las plantas en respuesta a las condiciones ambientales, la fotosíntesis es el más frecuente en la literatura debido a su papel en la síntesis de los hidratos de carbono para el aumento de la biomasa y la organogénesis (Jamil et al. 2006). Según García (2011), el CO₂ atmosférico es una de las materias primas empleada por las plantas para la fotosíntesis, en este proceso, la cantidad de carbono fijado es regulado por la radiación solar, la temperatura, el agua y los nutrientes presentes en el suelo, los cuales aportan en la conformación de tejidos y en el mantenimiento de las reservas de carbohidratos, que son necesarios para su crecimiento. En la fotosíntesis se centran los modelos de productividad y crecimiento de las plantas. (Keulen et al. 1982).

A continuación se describen las principales variables ecofisiológicas evaluadas en esta investigación:

Variables ambientales

Precipitación: Proceso meteorológico que proviene de la humedad atmosférica, se define como la cantidad de agua que cae en una superficie terrestre, ya sea en estado líquido o sólido. Se mide mediante el pluviómetro o el pluviógrafo se expresa como (mm/día) (OMM, 2011).

Brillo solar: es un factor climático que se define el número de horas de incidencia de la luz solar sobre la superficie terrestre, sirve como indicador de la cantidad de energía recibida

en una zona determinada, el instrumento empleado para cuantificar este factor se conoce como heliógrafo y se expresa en unidades de tiempo (h/día) (OMM, 2011).

La precipitación en Colombia corresponde a un comportamiento bimodal que caracteriza a la zona ecuatorial, según el IDEAM (2015) el trimestre de diciembre de 2014 a febrero de 2015 es típicamente seco en la zona centro de Colombia. Sin embargo, por esta época se inició una fase de calentamiento, situación que generó una anomalía en el comportamiento de la precipitación, la cual aumentó con relación a lo esperado de acuerdo a su promedio histórico para este trimestre, posteriormente se intensifica la época seca, pasando de sequía moderada a una extrema, con una disminución paulatina de las lluvias a lo largo de segundo y e inicio del tercer trimestre del año.

En cuanto al brillo solar se caracterizó por un acentuado aumento para el 2015 con relación al promedio histórico, esta condición se derivó del predominio del tiempo seco durante este año. Estas variaciones presentadas entre los datos históricos mensuales y datos presentados para el año 2015 en las variables de precipitación y brillo solar pueden ser atribuidas al fenómeno del Niño que es una alteración cíclica del sistema océano-atmósfera del Pacífico Tropical, que se caracteriza por presentar cuatro fases inicio, desarrollo madurez y debilitamiento, para el 2015 se presentaron las fases de inicio y desarrollo en donde las temporada seca y la temperatura se acentuaron progresivamente (IDEAM, 2015).

Según CENICAFÉ (2013) estas variaciones en el clima constituyen una amenaza para la caficultura, ya que los cambios en la temperatura, el brillo solar, la humedad atmosférica y las presiones generan alteraciones en el intercambio gaseoso, en la evapotranspiración y la disponibilidad del agua en el suelo y por ende afectan la productividad del sistema, como estrategia de adaptación a estos efectos se requiere el establecimiento de coberturas boscosas asociadas a los cafetales.

Variables fisiológicas

Radiación fotosintéticamente activa incidente (PARI): cantidad de radiación que llega directamente a la hoja, integrada por ondas con longitudes entre 400-700 nm (μmol fotones/ m^2/s) (De la Casa et al. 2011), Cannell (1985), Kumar y Tiezen (1976), evaluaron las tasas de fotosíntesis de los cafetales establecidos en condiciones de sombra y de plena exposición, encontrando que el nivel de radiación óptima para esta condición de sombra es de 300 y 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mientras que las hojas de las plantas de café en condición de exposición solar debe oscilar entre 600 a 900 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Eficiencia en el uso de la radiación (RC): es la relación entre la cantidad de CO_2 asimilado y la radiación fotosintéticamente activa incidente (PARI). Esta variable es usada para analizar el efecto de la radiación incidente sobre los cultivos, que al interactuar con otros factores como la temperatura y precipitación están relacionadas con fotosíntesis y la asimilación del CO_2 , por ende con el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos (De la Casa et al. 2011).

Transpiración: es la pérdida de agua en forma de vapor, en las plantas ocurre mediante los estomas que son unas diminutas aperturas situadas en las hojas, a través de ellos pasan el vapor de agua y los gases. En la determinación de la transpiración se debe tener en cuenta la radiación, la humedad atmosférica, el viento y la temperatura del aire. Su importancia radica en que permite el intercambio gaseoso, el movimiento de elementos minerales y nutrientes, el ascenso de la savia, y la disipación de la energía radiante (FAO, 2006).

El café hace parte del grupo de las plantas conocidas como C-3, que se caracterizan por presentar un proceso de oxidación de compuestos orgánicos llamado fotorespiración que ocurre durante el día, en este periodo la planta pierde agua. Esta actividad se encuentra influenciada por los estomas y las condiciones ambientales, ante cualquier estrés causado por los cambios en estas condiciones las plantas reaccionan cerrando las estomas, lo cual reduce la transpiración (Mota et al. 2001).

Conductancia estomática (gs): Es una variable que permite determinar el estado hídrico de la planta, el balance de energía y las relaciones fotosintéticas. Se expresa como $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$. El flujo del CO_2 es controlado por las células oclusivas presentes en las estomas, entre los factores que influyen sobre la actividad estomática, tenemos la radiación y el déficit hídrico, las elevaciones en la temperatura de la hoja, los incrementos en la concentración de CO_2 intercelular, la respuesta de las plantas es producir el ácido abscísico para inducir el cierre estomático (Shoeder et al. 2001).

Déficit de presión de vapor (DPV): se define como la cantidad de vapor de agua que necesita una planta para alcanzar el nivel de saturación de la atmósfera en un momento determinado. Esta variable está directamente ligada a la temperatura y la humedad relativa, su unidad de medida se expresa en kilopascales (kPa). El DPV se encuentra relacionado con el proceso de la transpiración, fotosíntesis y absorción de nutrientes, ya que las plantas liberan mayor cantidad de agua en forma de vapor a través de los estomas, aumentando la absorción de nutrientes y la fotosíntesis al haber déficit elevados (FAO, 2006). DaMatta (2004) y DaMatta y Rena (2002) indican que las condiciones que regulan el DPV son la reducción de la temperatura del aire y también del follaje, además el incremento de HR y disminución de la velocidad del viento, ya que causan una reducción substancial del DPV así como también de la tasa de transpiración por el ingreso de CO_2 .

Eficiencia uso de agua (WUE): se define como la tasa de asimilación de carbono (producto de la fotosíntesis) y la tasa de transpiración ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}$) (Fernández y Camacho, 2005).

Asimilación neta de CO_2 : es la relación entre la cantidad de CO_2 por unidad de área foliar y de tiempo, se define como la cantidad neta de carbono que se incorpora a la planta en un momento dado ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$). Es una forma de cuantificar la eficiencia de la fotosíntesis promedio de las hojas en un cultivo (Gardner et al. 1985). Cannell (1985), afirma que las plantas de café por poseer ruta fotosintética C3, producen un aumento del CO_2 producto de la foto respiración en la fase oscura, por consiguiente el punto de compensación se

encuentra entre el rango de 50 y 100 ppm a una temperatura de 20 a 25°C, y la fotosíntesis se reduce por el aumento de las presiones de oxígeno.

5. METODOLOGÍA

5.1. Localización del estudio

La investigación se desarrolló en el municipio de Tibacuy, departamento de Cundinamarca, Colombia que forma parte de la región del Sumapaz, situado en la zona centro-occidental, cuenta con una extensión total de 84 km², de los cuales solo 0,25 km² es urbano. El municipio limita con los municipios de Viotá, Nilo, Fusagasugá y Silvania y se encuentra ubicado a 85,1 km de Bogotá por la ruta 40 que une al departamento de Cundinamarca con el Tolima, su extensión total de 84 km². La cabecera municipal se encuentra situada a una altitud de 1.647 m, una temperatura media de 22°C, cuenta con 20 veredas y una precipitación media de 1.092 mm/mes (Secretaria de Planeación de Cundinamarca, 2013). Las fincas en donde se realizó este estudio están ubicadas en las veredas San Francisco, Albania, La Cajita, Jericó, Chisque, Calandaima y la Vuelta (Figura 1).

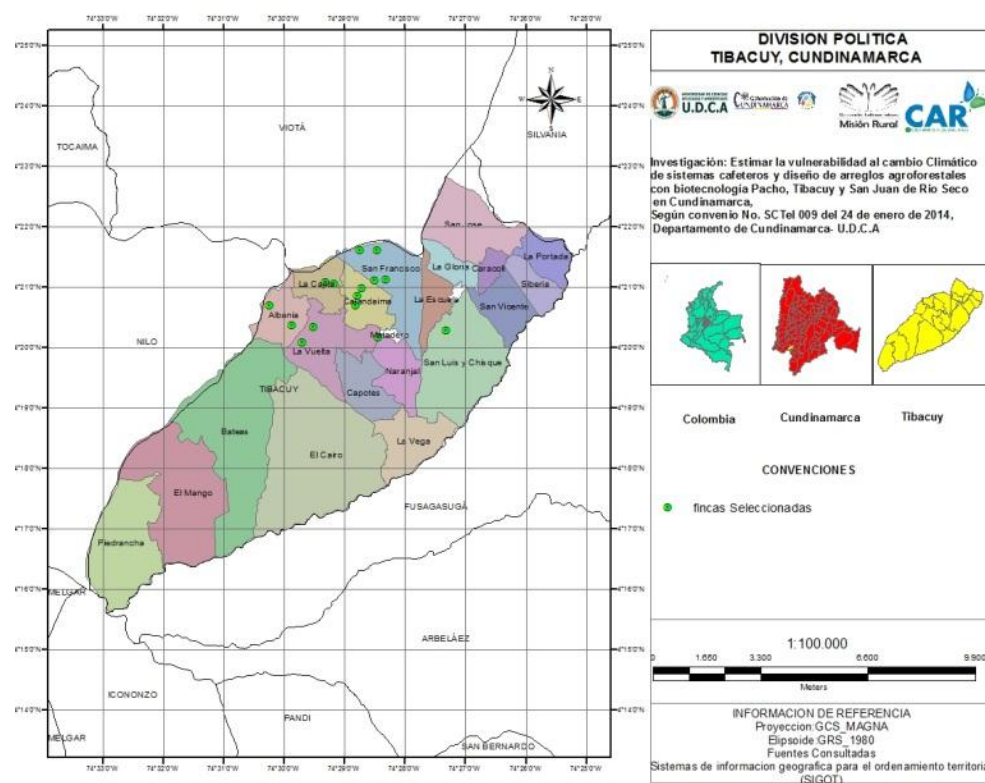


Figura 1. Mapa veredal del municipio de Tibacuy y ubicación de fincas seleccionadas para el estudio. Fuente: Convenio No. SC Tel 009 de 2014.

La economía de Tibacuy gira en torno a las actividades agropecuarias en donde sobresale el cultivo de café, seguido de la producción de tomate, habichuela, árboles frutales, cítricos, plátano y la avicultura (Alcaldía Municipal de Tibacuy, 2008). A continuación se presentan algunos de los indicadores de acuerdo con la Secretaría de Planeación de la Gobernación Cundinamarca.

Tabla 2: Indicadores del Municipio de Tibacuy (Fuente: Secretaria de Planeación de Cundinamarca. Oficina de Sistemas de Información, Análisis y Estadísticas 2013)

| INDICADOR / VARIABLE | Municipio |
|--|------------------|
| Extensión Territorial (km ²) Según IGAC | 84 |
| Altitud (m) – Cabecera | 1.647 |
| Temperatura media (°C) – Cabecera | 22 |
| No. Veredas, según POT | 20 |
| No. Total de Predios, según IGAC 2012 | 2.709 |
| No. Predios Urbanos | 434 |
| No. Predios Rurales | 2.275 |
| A. POBLACIÓN (CENSOS DANE) | Municipio |
| Población 2005 | 4.843 |
| Proy. Población (2013) | 4.830 |
| Cabecera | 525 |
| Resto | 4.305 |
| Densidad de la población (habitantes/km ²) | 58 |

5.2. Selección y características de las unidades de muestreo

La selección de las unidades de muestreo se hizo en el marco del Convenio 009 de 2014, aplicando la siguiente metodología: Se estudiaron sistemas cafeteros con tres niveles de sombrero para lo cual se partió de la clasificación de Federación Nacional de Cafeteros-Comité de Cafeteros de Cundinamarca, 2014, donde agrupa los sistemas de café con sombra como aquellos con más de 50 árboles/ha y /o más de 750 individuos de especies arbustivas semipermanentes/ha; semisombra entre 20 y 50 árboles por ha y/o entre 300 y 750 individuos de especies arbustivas semi-permanentes/ha y sol menos de 20 árboles por ha y/o menos de 300 individuos de especies arbustivas semipermanentes/ha.

Se seleccionaron cinco fincas y dentro de estas un lote por categoría de sombra, donde se estableció una parcela de 1000 m². En cada parcela se tomaron fotografías digitales con lente plano a una distancia de 1,50 m del suelo: 5 fotos por parcela, 4 en el extremo y 1 en el centro; las fotografías se analizaron con el software GLA® (Gap Light Analyzer) donde se obtuvo el porcentaje de sombra, de acuerdo a esto se conformaron tres niveles de sombrero: alto (48 – 70%), medio (21 -47) y bajo (0 – 12). En la selección de los lotes y fincas se trató de tener la mayor homogeneidad posible en cuanto a variedad (se trabajó con café variedad castillo), edad del café, área total de la finca (Tabla 3), estos dos últimos datos corresponden a consultas realizadas con el productor y/o encargado de la finca.

Tabla 3: Fincas seleccionadas para el presente estudio (Fuente: Convenio 009 de 2014)

| ID | Sistema | Vereda | Propietario | Finca | Altura (m) | Área finca(ha) | Área café (ha) | Edad del café |
|----|---------|--------------|----------------------|--------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| 2 | SA | La Cajita | Saturia Raigoso | El paraíso | 1622 | 4,3 | 3,4 | 4 |
| 3 | SA | Jericó | Adoralis Rodríguez | San Lorenzo | 1442 | 3,2 | 2 | 4 |
| 4 | SA | Chisque | Pedro Liévano | Tulipán dos | 1466 | 10,6 | 5,5 | 4 |
| 5 | SA | Calandaima | Graciliano Rodríguez | Las Antillas | 1613 | 7,04 | 4,5 | 4 |
| 6 | SA | La Vuelta | María Nancy Méndez | La Vuelta | 1576 | 4,7 | 4 | 4 |
| 1 | SM | Albania | Alirio Moreno | La Primavera | 1773 | 4,16 | 0,32 | 4 |
| 7 | SM | Albania | Jacinta Castillo | Villa Andrea | 1746 | 4,5 | 1,5 | 4 |
| 8 | SM | S. Francisco | HildaTocua Burgos | Bella Vista | 1812 | 3,5 | 2,2 | 4 |
| 10 | SM | Calandaima | Dioved Canacue | La Parada | 1546 | 5,8 | 1,8 | 5 |
| 14 | SM | Calandaima | Héctor Escamilla | Parcela 27 | 1576 | 3 | 1,5 | 4 |
| 9 | SB | S. Francisco | María Otilia Tocua | Parcela # 66 | 1728 | 3,5 | 2 | 5 |
| 11 | SB | Calandaima | Cesar Segura | La Valentina | 1676 | 3,8 | 3 | 4 |
| 12 | SB | La Cajita | Fanny Murcia | Los Reyes | 1676 | 10 | 2 | 6 |
| 13 | SB | S. Francisco | Henry Rodríguez | La Victoria | 1546 | 3,5 | 1,3 | 4 |
| 15 | SB | La Vuelta | Norbey España | Bélgica | 1620 | 3,5 | 3,2 | 6 |

5.3. Composición florística

En las parcelas de muestreo la abundancia absoluta de árboles fue mayor en cafetales con sombrero alto frente a cafetales con sombrero medio y bajo; en promedio la cantidad de musáceas fue mayor en cafetales de sombrero bajo en comparación a cafetales de sombrero alto y medio (Tabla 4). La especie más abundante en cafetales de sombrero alto fue quiebrajacho (*Caliandra pittieri*) con un total de 52 ind/ha, mientras que en cafetales de sombrero medio y bajo la especie más abundante fue Nogal (*Cordia alliodora*) con 26 ind/ha y 10 ind/ha, respectivamente. Es de destacar que el quiebrajacho es una especie con una densidad de copa media y semicaducifolia, mientras que el nogal tiene una densidad de copa baja y es una especie caducifolia (Convenio 009 de 2014).

Tabla 4: Abundancia de árboles y musáceas en fincas cafeteras de Tibacuy.

| Variable | Nivel de sombrero | | |
|----------------------|-------------------|-------|------|
| | Bajo | Medio | Alto |
| Total árboles/ha | 40 | 144 | 192 |
| Total de musáceas/ha | 256 | 4 | 110 |

5.4. Medición de las variables ecofisiológicas

Las mediciones se realizaron en el área de la parcela de 1000 m², allí se tomaron tres plantas de café que presentaban óptimas condiciones fisiológicas y fitosanitarias y que reflejen la condición del sistema productivo. En cada planta monitoreada, se seleccionó una hoja por estrato (bajo - H1-, medio-H2- y alto -H3-) del cuarto par a partir del ápice de la rama. Se seleccionaron ramas que se encontraban con orientación al Norte, buscando que la luz solar llegue de la misma forma sobre el dosel de la planta a distintas horas del día (Figura 3).

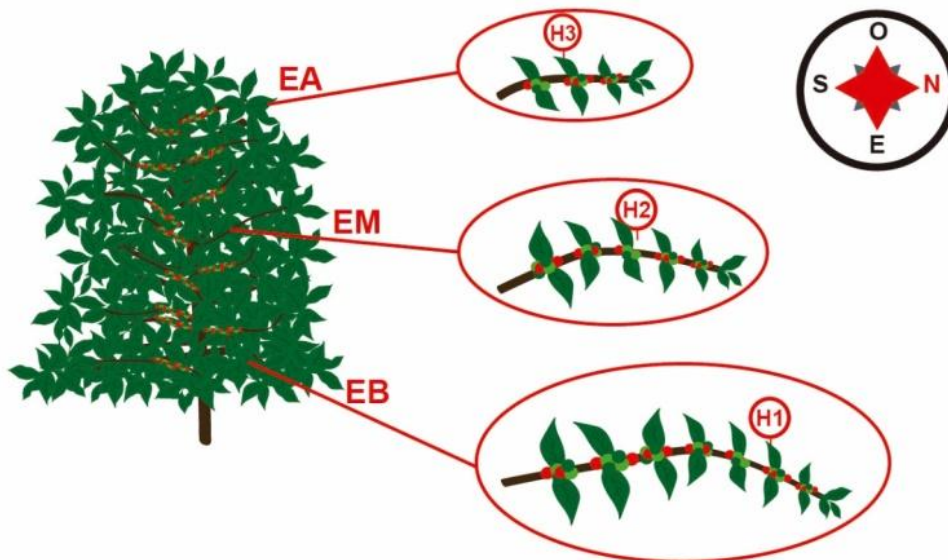


Figura 2: Ilustración de toma de muestras en las plantas de café. (EA) Estrato Alto, (EM) Estrato Medio, (EB) Estrato Bajo, (H1) Hoja uno, Hoja dos y Hoja Tres. Fuente: Autor.

Las mediciones se realizaron en tres horas del día (09:00, 12:00 y 15:00 horas), esto con el fin de tener mayor representatividad sobre el comportamiento diario. Las variables medidas fueron: radiación incidente (PARi), déficit de vapor de agua (DPV), conductancia estomática (gs), asimilación neta de CO₂ (A), eficiencia del uso del agua (WUE) y eficiencia de uso de la radiación o rendimiento cuántico (RC), esta última se estimó como la relación entre la radiación incidente y la asimilación neta de CO₂. La medición de las variables se realizó empleando un sistema de fotosíntesis portable CIRAS-3 que incluye un analizador infrarrojo de gases (CO₂/H₂O) y sensores (Figura 3) y que también proporcionó datos de temperatura ambiente, temperatura de la hoja y humedad relativa. Las mediciones en las 15 fincas se realizaron en tres periodos de muestreo en el año 2015, que corresponden a enero o época lluviosa, junio o de transición y julio o periodo seco.



Figura 3: Consola de CIRAS 3 parte frontal: Fuente: PP Systems 2013

Variables de precipitación y brillo solar.

Se colectaron datos de precipitación y brillo solar de la estación de la Granja Tibacuy, Código 2119503, donde se cuenta con los registros diarios de los meses objeto de estudio: enero, junio y julio (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia- CENICAFÉ, 2015).

5.5. Métodos estadísticos

Se realizaron análisis de varianza, en los casos en que se rechazó la hipótesis de igualdad de tratamientos se utilizó la prueba de comparación de medias LSD de Fisher con una significancia de 0,05. Para que los datos de las variables conductancia estomática, PARi y eficiencia de uso de la radiación logaran normalidad fueron transformadas a logaritmo natural y asimilación neta, transpiración, eficiencia en el uso del agua a raíz cuadrada. Se

estudió la relación entre las variables y el nivel de sombrero, mediante un análisis de componentes principales a partir del cual se obtuvo el gráfico biplot. Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico InfoStat versión 2009 (Di Rienzo et ál. 2009). El diseño experimental fue de parcelas divididas en diseño completamente al azar, donde el factor principal fue el nivel de sombrero y en la subparcela estuvo el mes de muestreo:

$$y_{ijk} = \mu + S_i + U_j(i) + M_k + q_{ijk}$$

Dónde:

S_i : efecto del nivel de sombrero

$U_j(i)$: error del nivel de sombrero

M_k : efecto del mes de muestreo

$(SM)_{ik}$: interacción del nivel de sombrero por mes de muestreo

q_{ijk} : error experimental.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y EL BRILLO SOLAR

Mediante la información secundaria obtenida (precipitación y brillo solar) a través Cenicafé de la estación agroclimática La Granja, situada en el municipio de Tibacuy, se realizó la categorización de los periodos de muestreo.

Tabla 5: Datos históricos de precipitación y brillo solar, estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. FUENTE: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé", Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia. Septiembre de 2015.

| Mes | Lluvia (mm/mes) | Brillo solar (h/mes) |
|------|--------------------|-------------------------|
| Ene. | 70,1 | 173,4 |
| Feb. | 85,6 | 139,7 |
| Mar. | 115,0 | 124,2 |
| Abr | 125,0 | 102,9 |
| May | 103,2 | 112,1 |
| Jun | 56,5 | 119,6 |
| Jul | 41,3 | 132,1 |
| Ago | 38,0 | 132,2 |
| Sep | 67,8 | 127,6 |
| Oct | 148,7 | 126,2 |
| Nov | 161,0 | 124,0 |
| Dic | 99,6 | 157,6 |

Precipitación

A partir de la información obtenida en la estación agroclimática La Granja, situada en el municipio de Tibacuy, se clasificó cada uno de los muestreos de acuerdo a su precipitación promedio, en donde el mes de enero se catalogó como el mes de muestreo lluvioso (Ll), el mes de junio como un mes de transición (T) y el mes de julio (S) como un periodo seco. Esta información se contrastó con los datos históricos del comportamiento de la

precipitación en estos mismos meses, observando que para el mes de enero de 2015 esta variable un valor promedio superior frente al histórico (96.9 vs 70.1 mm/mes), mientras que para los meses de junio y julio de 2015 la cantidad de lluvia disminuyó frente al promedio histórico (33,6 vs 56,5 y 17,6 vs 41,3 mm/mes respectivamente) (Figura 4 y 5).

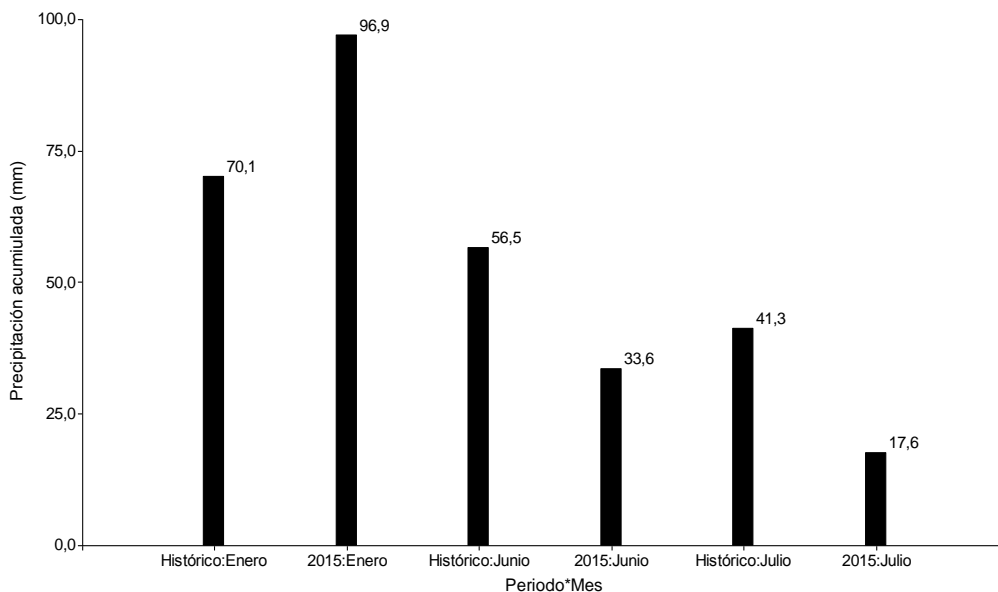


Figura 4: Precipitación promedio por cada periodo de muestreo vs histórico estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. Fuente Federación Nacional de Cafetero de Colombia (2015).

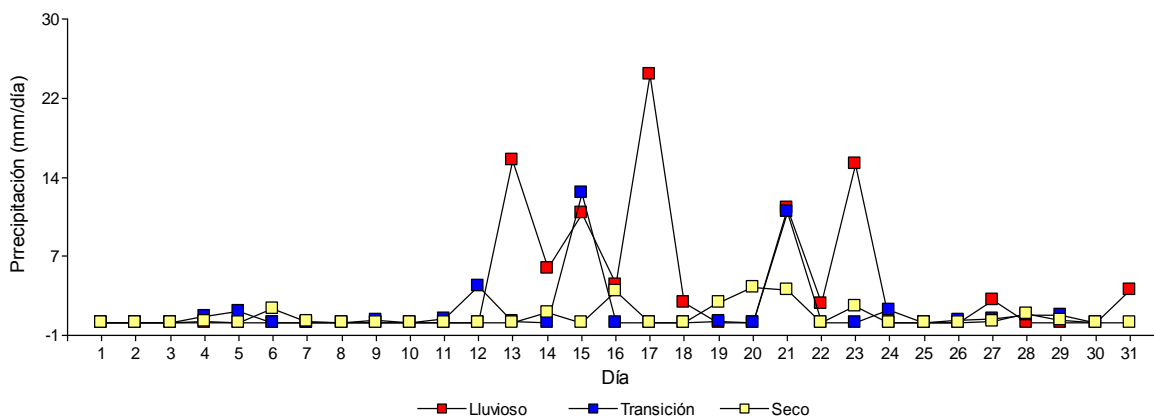


Figura 5. Comportamiento de la precipitación promedio diaria durante cada periodo de muestreo estación agroclimática La Granja, municipio de Tibacuy.

Brillo solar

Se cuantificó el comportamiento del brillo solar para cada uno de los periodos de muestreo. Esta información fue contrastada con los datos históricos del comportamiento del brillo solar en estos mismos meses, observando que para los meses evaluados esta variable presentó valor promedio inferior frente al histórico (173,4 vs 156,4, 119,6 vs 49,6 y 132,1 vs 98,9 horas/mes para enero, junio y julio respectivamente) (Figura 6 y 7).

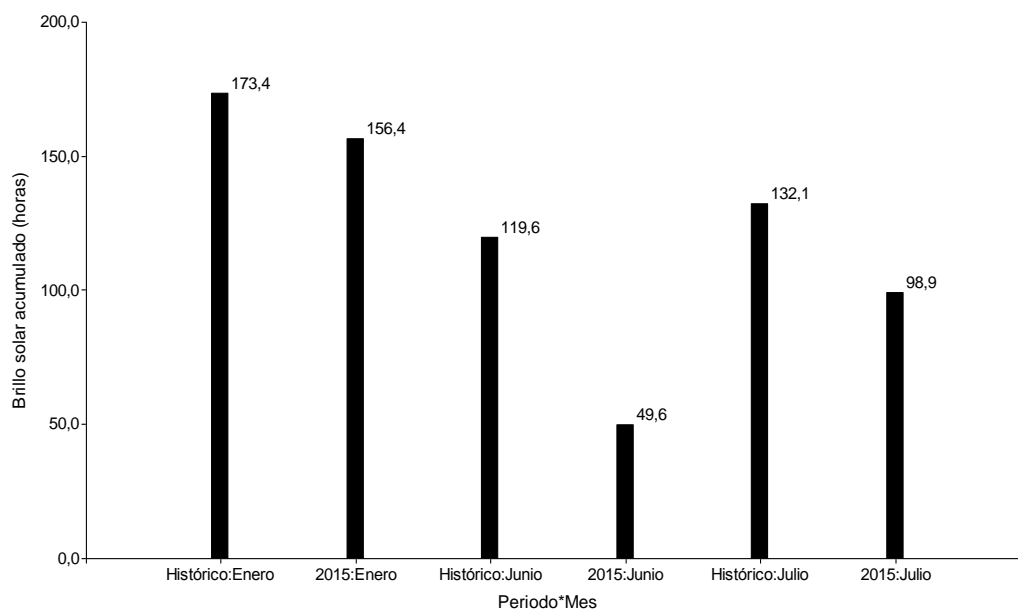


Figura 6. Brillo solar promedio por cada periodo de muestreo vs promedio histórico, estación agroclimática La Granja municipio de Tibacuy. Fuente: Federación Nacional de Cafetero de Colombia (2015)

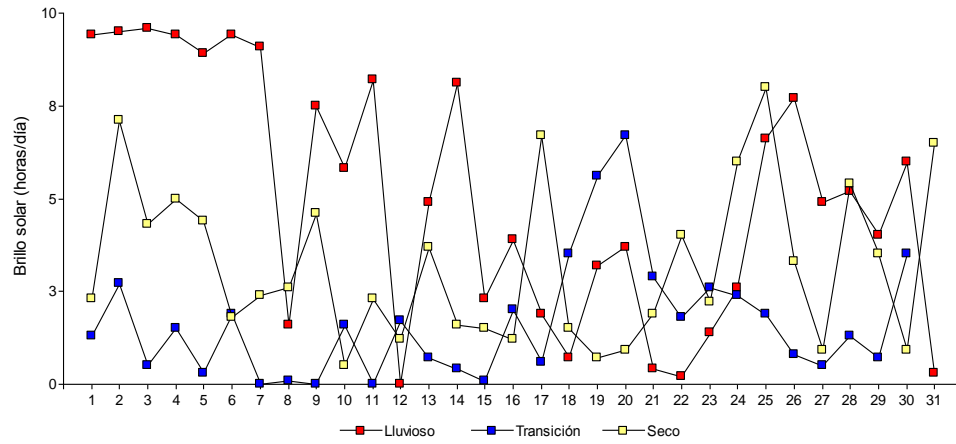


Figura 7. Comportamiento del brillo solar promedio diario por muestreo (h/día)

6.2. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DE LA HOJA

La temperatura ambiente y temperatura de la hoja en promedio fue mayor en sistemas de sombra baja, mientras que fincas con sombrero medio y bajo presentaron mayor humedad relativa que fincas de sombrero alto (Tabla 6).

Tabla 6: Promedio de temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de la hoja durante los meses de muestreo

| Sombra | Mes | Temperatura ambiente | Humedad relativa (%) | Temperatura de la hoja |
|--------------------|------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Alta | Lluvioso | 28,9 | 60,0 | 30,1 |
| | Transición | 28,4 | 68,7 | 27,1 |
| | Seco | 30,0 | 64,8 | 27,1 |
| Promedio SA | | 29,1 | 64,5 | 28,1 |
| Media | Lluvioso | 29,3 | 64,5 | 30,5 |
| | Transición | 28,8 | 72,4 | 27,1 |
| | Seco | 29,4 | 71,4 | 27,1 |
| Promedio SM | | 29,2 | 69,4 | 28,2 |
| Baja | Lluvioso | 30,6 | 63,1 | 31,8 |
| | Transición | 28,5 | 72,1 | 25,8 |
| | Seco | 30,1 | 71,9 | 27,8 |
| Promedio SB | | 29,7 | 69,0 | 28,5 |

6.3. COMPORTAMIENTO DE VARIABLES ECOFISIOLÓGICAS BAJO TRES NIVELES DE SOMBRÍO

6.3.1. *PARi*

Se registraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) en la PAR_i entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en SB, seguido de la condición de SM y SA (410,7; 238,3; 93,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, respectivamente). Se registraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) para la interacción nivel de sombrero y meses de muestreo, siendo mayor la PAR_i en el muestreo S

en fincas con sombrero bajo y menor en el periodo S en las fincas en condición de SA. (Figura 8).

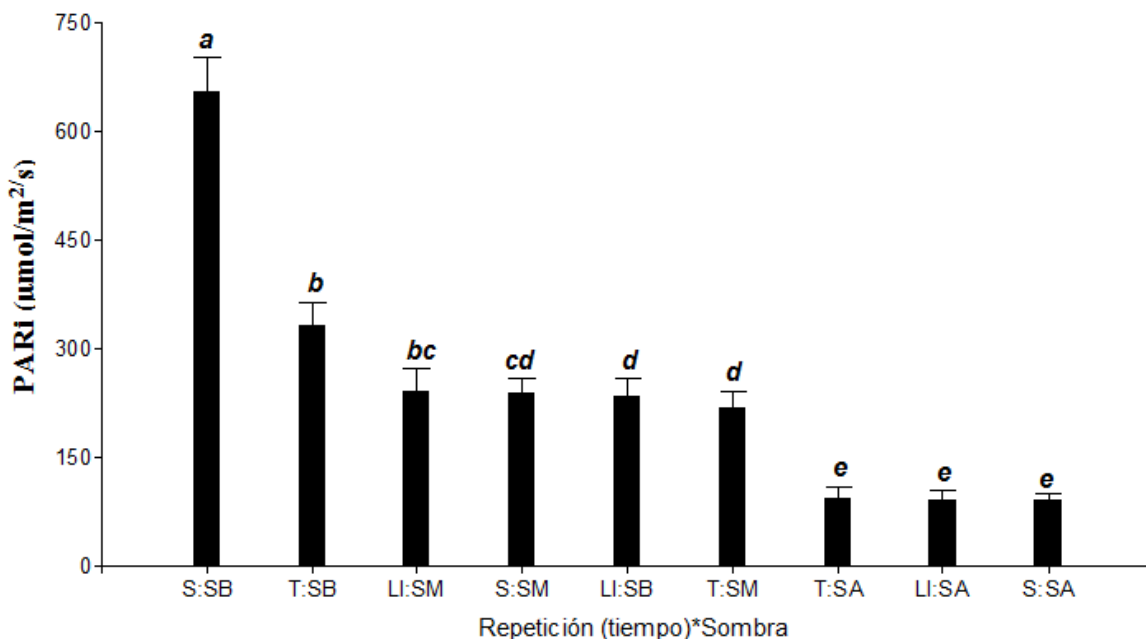


Figura 8. Radiación incidente ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Las fincas de SA y SM presentaron una reducción del 77% y 41% respectivamente, en comparación con la radiación incidente de las fincas de SB, esto concuerda con Siles (2001), que reportó la disminución de la radiación (50 – 70%) en cafetales evaluados bajo dos tipos de coberturas (*Eucalypto deglupta* y *Terminalia ivorensis*, respectivamente) en comparación a la PARi por plantas de café a plena exposición en Costa Rica. Este comportamiento puede ser atribuido al alto nivel de sombrero generado por el dosel de los árboles asociados al cultivo que disminuyeron considerablemente la radiación que llega a las plantas de café; en ese sentido, los sistemas cafeteros de sombra alta y media presentaron mayor abundancia/ha de árboles que las fincas de sombra baja (Tabla 4); adicionalmente, en fincas de sombra alta la especie más abundante fue el quiebrajacho que es una especie con una densidad de copa media y semicaducifolia, mientras que el nogal

tiene una densidad de copa baja y es una especie caducifolia (Convenio 009 de 2014), lo que pudo significar una mayor disponibilidad de luz para el café en fincas de sombrío bajo. Además la nubosidad que se presenta en las regiones de Colombia donde se cultiva el café, que puede disminuir la PARi hasta en un 50%, generando alteraciones en los procesos fisiológicos de las plantas, como el cierre estomático, y por ende la disminución tanto de la asimilación neta de CO₂ y como de la transpiración (Arcila et al., 2007).

Los valores presentados en el muestreo de las fincas en condición de SB y SM se encuentran en el nivel de saturación de radiación, mientras que los muestreos realizados para los predios SB registraron valores muy inferiores al punto de saturación para las hojas de las plantas en condición de sombra. Según Cannell (1985), Kumar y Tiezen (1976), el nivel de radiación óptima para esta condición es de 300 y 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mientras que las hojas de las plantas de café en condición de exposición solar debe oscilar entre 600 a 900 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Cenicafé (2009), recomienda que el porcentaje de sombra requerido para el cultivo de café en el municipio de Tibacuy de acuerdo a su ubicación geográfica es de aproximadamente un 29.1%. Según la clasificación otorgada en este trabajo, esta condición la presentarían las fincas evaluadas del sistema de SM (21-47%). Según Arcila et al. (2007) cuando el nivel de sombra es superior, se presenta una competencia por radiación, nutrientes y humedad en el suelo, mientras que cuando el sombrío es menor al requerido las plantas presenta aumento de temperatura en la hojas, cierre estomático y reducción de la fotosíntesis.

En la mayor radiación incidente parece haber influido más la condición de sombrío que el mes de muestreo; sin embargo, la mayor radiación en el periodo S en la condición de sombra baja lo cual pudo estar relacionado con una menor nubosidad presentada o a que en esta época los cafetos interceptaron más radiación por la pérdida de follaje que pudieron presentar algunos de los individuos arbóreos asociados al cultivo de café.

6.3.2. Eficiencia en el uso de la radiación o rendimiento cuántico

No se registraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la eficiencia del uso de la radiación entre los tres niveles de sombrero ($0,02 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol fotones}$). Existen diferencias significativas ($p < 0,0001$) para la interacción nivel de sombrero y meses de muestreo, siendo mayor la eficiencia en el uso de la radiación en el muestreo LI para los tres niveles de sombrero, la menor eficiencia se presentó en el muestreo S en fincas con sombra baja. (Figura 9).

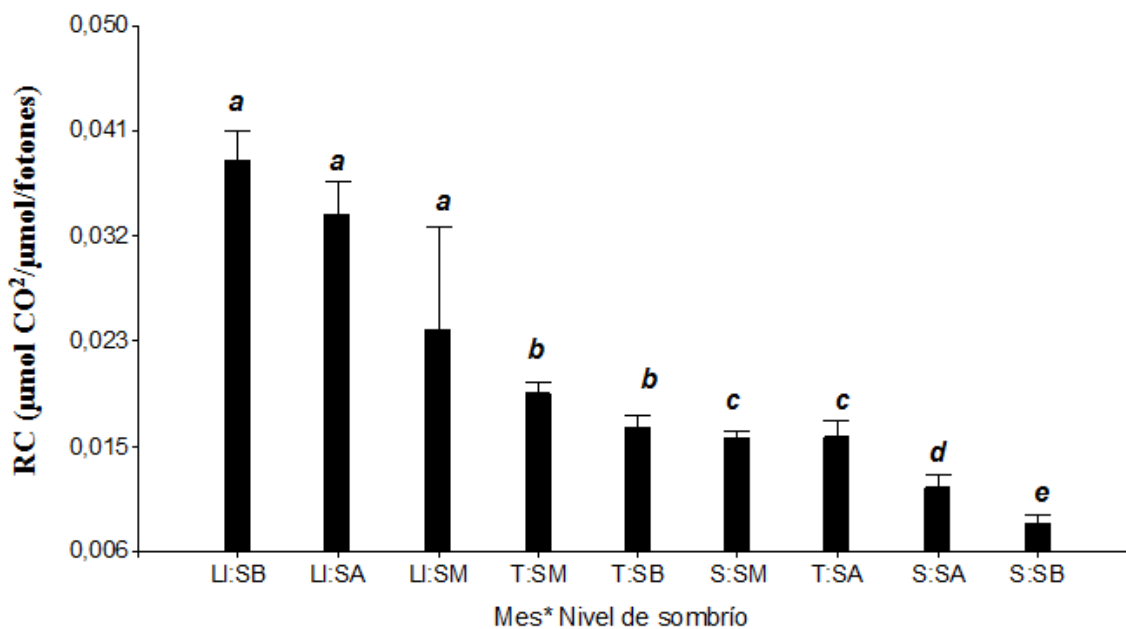


Figura 9. Rendimiento cuántico ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol fotones}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0,05$).

El mayor rendimiento cuántico en el muestreo lluvioso está relacionado a que buenas condiciones de disponibilidad hídrica favorecen la apertura estomática, lo cual coincide con lo planteado por Covarrubias (2007) quien menciona que una de las respuestas mejor caracterizadas ante la limitación de agua es el cierre, parcial o total de los estomas lo cual evita que la planta se deshidrate.

Resultados reportados por López (2004) indican un valor de $0,0136 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol}$ fotones, para un cultivar situado a una altitud de 1900 m en el municipio de Chinchiná-Caldas, lo cual concuerda con el valor promedio obtenido para las tipologías evaluadas en el presente estudio ($0,02 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol}$ fotones), sin embargo difiere con lo reportado por Friend (1984) en Hawaii-Estados Unidos, donde encontró que el RC es de $0,034 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol}$ fotones para las hojas de los cafetos expuestas al sol y para las hojas a la sombra es de $0,055 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol}$ fotones.

6.3.3. Conductancia estomática

Se detectaron diferencias significativas ($p < 0,0001$) en la conductancia estomática entre niveles de sombrero, siendo mayor en las fincas con SM y SB frente a las fincas con SA ($136,5$; $123,9$ y $81,3 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$, respectivamente). Se registraron diferencias significativas ($p = 0,014$), para la interacción periodo de muestreo y nivel de sombrero siendo mayor la gs en el muestreo LI en fincas con SM y SB y menor en el muestreo S en fincas con SA (Figura 10).

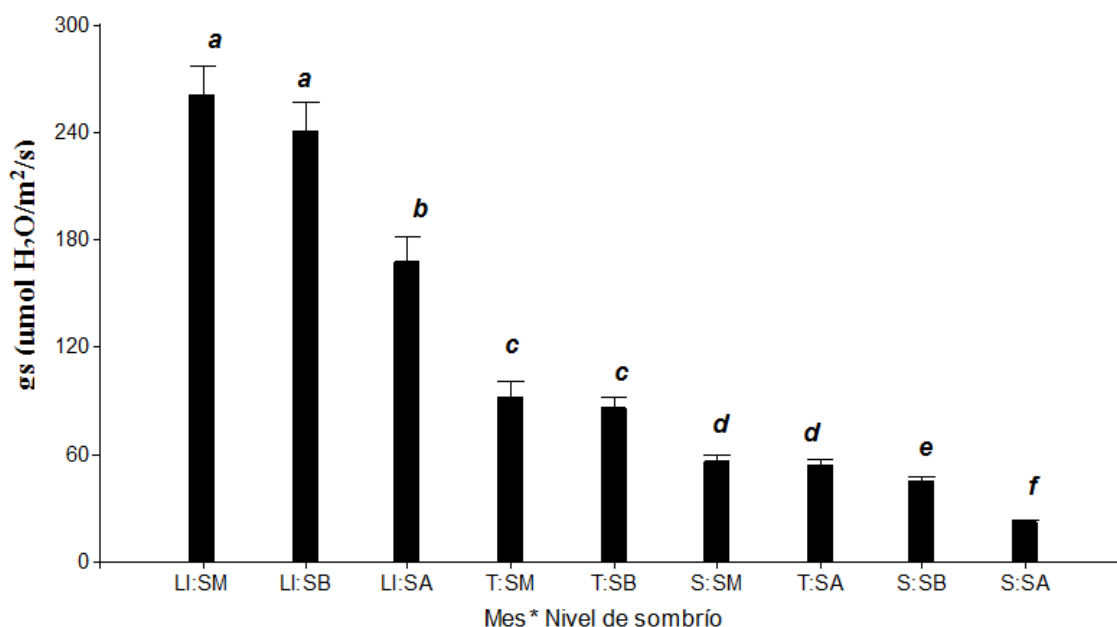


Figura 10. Conductancia estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el

error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Barros et al. (1997) indican que la apertura estomática en los cafetos es altamente sensible al DPV, es decir que la conductancia se reduce en la medida en que el DPV aumenta o dicho de otra manera cuando el aire se torna más seco. Esta afirmación coincide con los resultados obtenidos para la condición de SM ya que en las fincas evaluadas bajo este sistema se reportaron los mayores valores de g_s y los menores en el DPV. Adicionalmente, la humedad relativa en fincas de SM y SB fue mayor frente a fincas de sombrero alto (Tabla 6).

Los valores obtenidos en los cafetos evaluados en condición de SM concuerdan con las investigaciones desarrolladas por Nutman (1937) que registra en plantas con sombra una relación positiva entre la intensidad de luz moderada y la apertura estomática, y afirma que por el contrario en plantas sin sombra la apertura estomática se reduce con la exposición de las hojas a la luz directa, especialmente sobre las 12 horas del día. Además, un estudio desarrollado en Turrialba, Costa Rica por Siles (2001), reporta que en los cafetales establecidos con sombrero, la g_s es mayor, alcanzando un valor $120 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$. Sin embargo los cafetos evaluados en condición de pleno sol la conductancia estomática fue menor, donde se registraron valores de $49,66 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$.

Según Shoeder et al. (2001) los factores que regulan el comportamiento de los estomas se encuentran conformados por la radiación, temperatura, humedad relativa, estacionalidad de la lluvia, el DPV, estímulos hormonales, concentración de CO_2 y el estado hídrico. Wormer (1965) y Siles (2001) encontraron que la apertura estomática está influenciado por la disponibilidad del agua en el suelo siendo mayor su apertura en época de lluvias, además que existe una relación negativa entre la g_s con la temperatura, y la radiación. Esto coincide con el presente estudio, ya que los mayores valores de g_s fueron obtenidos en el muestreo Ll, donde se registraron las mayores precipitaciones.

6.3.4. Asimilación neta de CO₂

Se registraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) en la asimilación neta entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en fincas con SB y en fincas de SM, frente a las fincas de SA (4,6; 4,3 y 1,8 $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, respectivamente) se detectaron diferencias significativas ($p = 0,0059$) para la interacción nivel de sombrero y meses de muestreo, siendo mayor la asimilación en el muestreo LI para los niveles de SB y SM. La menor asimilación se presentó en el muestreo S bajo SA (Figura 11).

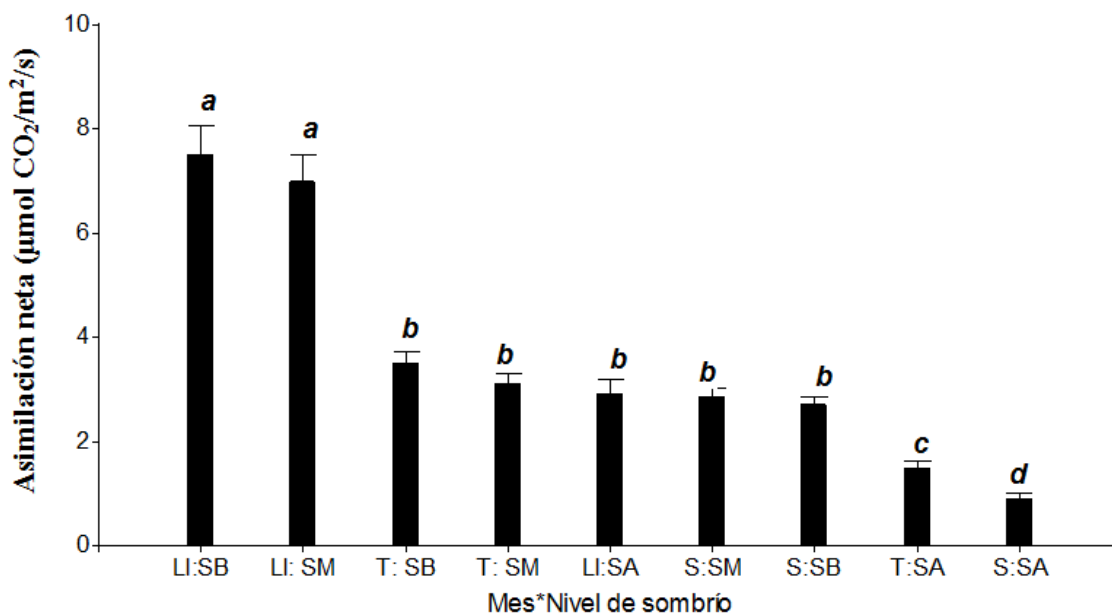


Figura 11. Asimilación neta de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) durante los tres periodos de muestreo bajo tres niveles de sombrero: SB (sombra baja), SM (sombra media), SA (sombra alta). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas.

La mayor asimilación promedio en fincas de SB y SM frente a fincas de SA coinciden con mayor radiación incidente en esos sistemas; lo cual está de acuerdo con los planteamientos de López (2004) quien manifiesta que la radiación y la temperatura son variables climáticas que influyen sobre la fijación del CO₂ atmosférico por los vegetales.

Las tasas de asimilación más altas en las fincas con SB y con SM durante el mes LI frente a fincas de SA coinciden con la mayor conductancia estomática en fincas de SM y SB. Los

valores registrados en el muestreo S en la condición de SA, indican que la asimilación de CO_2 fue afectada por la menor disponibilidad de agua y el alto porcentaje de sombra, lo que disminuyó la cantidad PAR_i que recibieron las plantas. Según Anacafé (2012) se ha comprobado tanto en Guatemala como en otros países cafeteros, que cuando los porcentajes de sombrero son mayores al 50%, la función fotosintética del cafeto es menor, ya que con poca intensidad lumínica se reduce la apertura de estomas de las hojas, perturbando la producción de la energía que se requiere para llevar a cabo los procesos metabólicos de la planta.

En fincas con SB en el mes Ll se registraron mayores valores promedio de temperatura ambiental y de la hoja: 30,6 y 31,8 °C respectivamente, frente a fincas de SM: 29,3°C de temperatura ambiente y 30,5°C de temperatura de la hoja y frente a fincas de SA donde en el mes Ll la temperatura ambiente y de la hoja fue menor: 28,9 y 30,1°C, respectivamente. Lo anterior difiere de lo planteado por Arcila et al. (2007) quienes plantean que cuando el sombrero es menor al requerido, en las plantas se presenta aumento de temperatura en las hojas, cierre estomático y reducción de la fotosíntesis.

Las fincas de SM en el mes Ll registraron mayores valores promedio de PAR_i (242,6 μmol fotones/ m^2/s) frente a fincas de SB y SA durante el mismo mes: 227 y 93 μmol fotones/ m^2/s , respectivamente. Lo anterior indica que la mayor disponibilidad de agua y de radiación estaría influyendo en las mayores tasas de asimilación de CO_2 en fincas de SM y SB frente a fincas de sombrero alto. Esto coincide con lo mencionado por Shoeder (2001), que indica que el cierre estomático es mayormente sensible al exceso de sombrero.

6.3.5. Impacto de la radiación incidente sobre la asimilación neta de CO_2

En el estudio realizado se observó que los mayores valores de saturación lumínica se presentaron en las plantas evaluadas en el periodo Ll, seguido del muestreo T y el S (323; 306 y 210 μmol fotones m^2/s respectivamente). En cuanto al punto de compensación el mayor valor se registró en el muestreo Ll, seguido del S y el de T (32; 30 y 19 μmol fotones

m^2/s , respectivamente). La mayor asimilación se presentó en el periodo Ll, seguido del muestreo T y el S ($8,24$; $3,46$ y $2,2$ $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ respectivamente) (Figura 12).

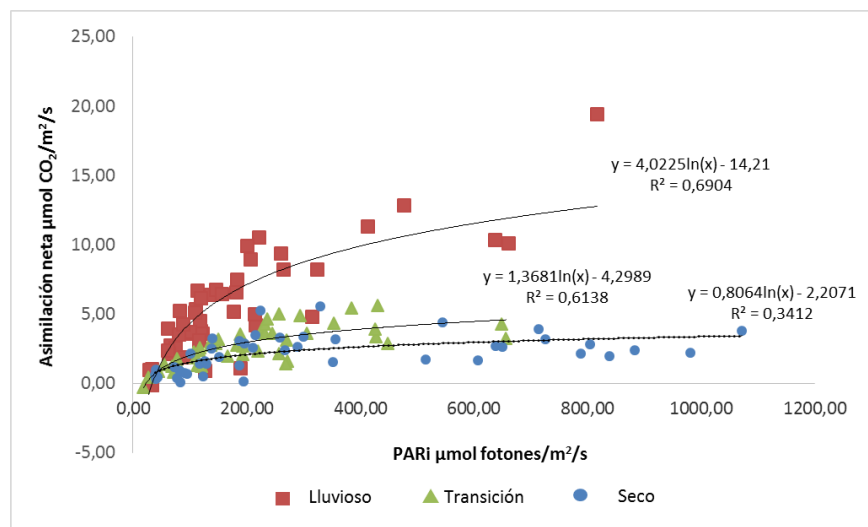


Figura 12. Impacto de la radiación incidente ($\mu\text{mol fotones m}^2/\text{s}$) sobre la asimilación neta de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) en plantas de café en tres periodos de muestreo S (seco), T (transición), Ll (lluvioso), en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca, Colombia.

Según Tio (1962), el punto de saturación lumínica de las plantas café bajo sombra es alcanzado entre de 250 y $400 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$ y el punto de compensación entre de 8 y $18 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$, teniendo en cuenta lo anterior para las fincas evaluadas en el municipio de Tibacuy, el muestreo efectuado en el periodo de T presentó características similares a las encontradas en la literatura; sin embargo, el valor de asimilación alcanzado en el rango de saturación fue inferior $4 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, comparado con el punto óptimo $6 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ reportado por Kumar y Tiesten, (1976). En el muestreo Ll se registró una asimilación promedio de $8,24 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, en unas condiciones similares de saturación de $323 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$ y superiores de compensación de $32 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$. En el muestreo S la asimilación alcanzada fue menor, con un valor de $2,2 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$, con una saturación $210 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$ y el de compensación $30 \mu\text{mol fotones}/\text{m}^2/\text{s}$. Lo anterior indica que la disponibilidad de agua es una variable determinante en el uso eficiente de la radicación y en la eficiencia fotosintética de las plantas de café.

6.3.6. Déficit de presión de vapor

Hubo diferencias significativas ($p < 0,0001$) en el DPV entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en fincas con SB y SA frente a SM (1,7; 1,7 y 1,5 kPa, respectivamente). (Figura 13). Se registraron diferencias significativas ($p = 0,0536$) en el DPV entre las épocas de muestreo, siendo mayor en el muestreo Ll, seguido del periodo T y el S (1,9; 1,6 y 1,4 kPa, respectivamente) (Figura 14). No se registraron diferencias significativas para la interacción nivel de sombrero por mes de muestreo ($p > 0,05$).

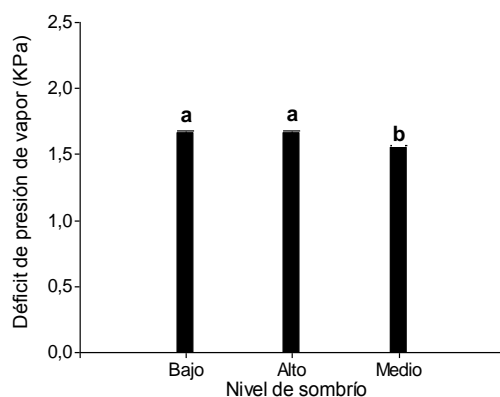


Figura 13. Déficit de presión de vapor DPV (kPa) bajo tres niveles de sombrero: SB (sombra baja), SM (sombra media), SA (sombra alta). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas.

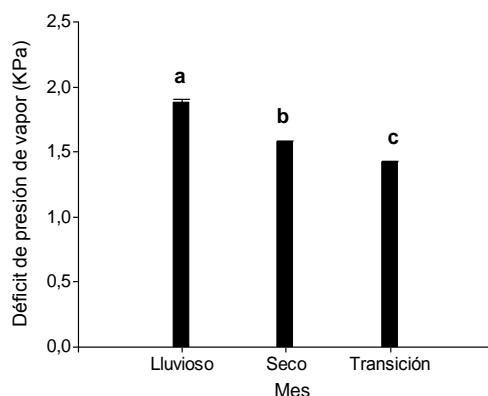


Figura 14. Déficit de presión de vapor DPV (kPa) durante los tres periodos de muestreo, Lluvioso (Ll), transición (T) y seco (S). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0,05$).

Kanechi et al. (1995) afirman que los estomas de la hoja del cafeto son sensibles a cambios de presión de vapor, considerándose que variaciones entre 1 y 1,5 kPa conducen al cierre temporal de los estomas. DaMatta (2004) y DaMatta y Rena (2002) indican que las condiciones que regulan el DPV son la reducción de la temperatura del aire y también del follaje, además el incremento de HR y disminución de la velocidad del viento, causando una reducción substancial del déficit de presión de vapor (DPV) así como también de la tasa de transpiración por el ingreso de CO₂ a la planta. Lo anterior es contradictorio a lo registrado en el presente estudio donde en promedio la humedad relativa fue mayor en sistemas de SB y SM y en el periodo de transición.

Las menores tasas de DPV en fincas con SM parecen estar asociadas a la mayor conductancia estomática en plantas de café de dicho sistema; esto estaría relacionado con lo planteado por López (2004) quien menciona que un mayor DPV afectara el potencial hídrico foliar y la apertura de los estomas, limitando la transpiración.

6.3.7. Transpiración

Se registraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) en la transpiración entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en fincas con SB, seguido de las fincas de SM, y menor en fincas de SA, (2,01; 2,0 y 1,3 $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$, respectivamente). Existen diferencias significativas ($p = 0,0002$) para la interacción nivel de sombrero y mes de muestreo, siendo mayor la transpiración en el muestreo L1 para los niveles de SM y SB. La menor transpiración se presentó en el muestreo S en la condición SA (Figuras 15).

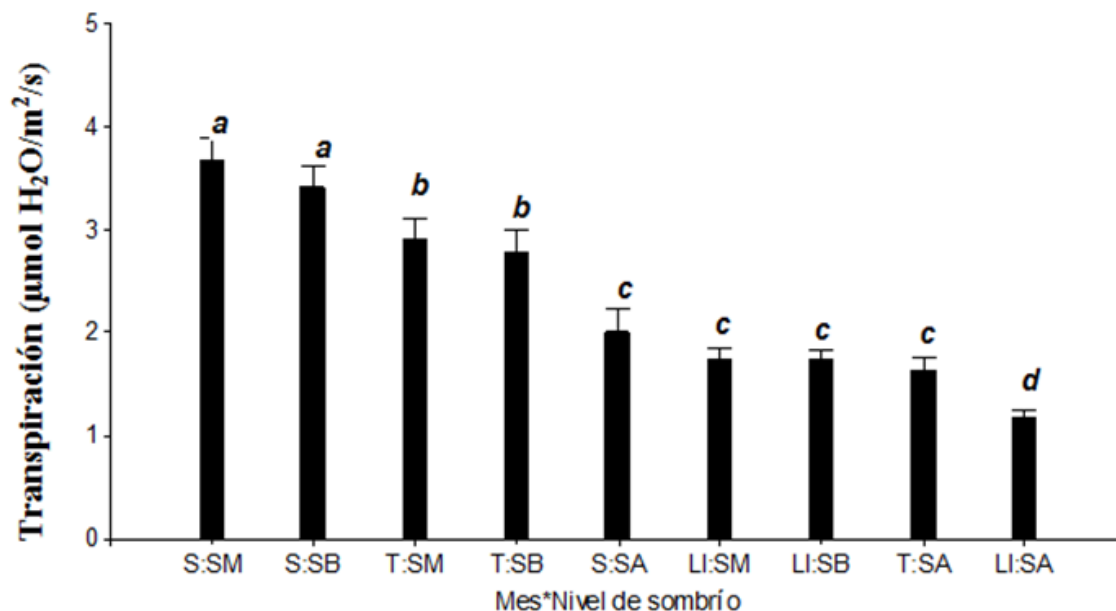


Figura 15: Transpiración ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrío: SA (sombra alta), SM (sombrío medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Las plantas evaluadas en condición de SB y SM media registraron los niveles de transpiración más elevados, mientras que en la condición de SA la transpiración se redujo en un 39,5%. Las menores tasas de transpiración en fincas de SA coinciden con una menor conductancia estomática y asimilación de CO_2 ; en ese sentido, en un estudio realizado por Mariño (2014) en Viçosa-MG, Brasil, se analizaron los efectos de dos condiciones de luminosidad (pleno sol y 15% de la radiación solar) y disponibilidades de agua en el suelo sobre las relaciones hídricas y el desempeño fotosintético en *C. arabica* en dos épocas contrastantes concluyendo que en la sombra las reducciones de conductividad hidráulica y transpiración, indican una optimización del uso del agua.

La mayor transpiración durante el periodo S en plantas de café de SM y SB parece estar más relacionado a una mayor radiación disponible y temperatura de la hoja que a una reducción en la humedad relativa. Según Tracy y Hernández (2005), la radiación adecuada permite la apertura de los estomas, éstos regulan el intercambio de gases, como la entrada de CO_2 para llevar a cabo la fotosíntesis, y la salida de H_2O en forma de vapor.

6.3.8. Eficiencia de uso del agua

Se registraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) en la WUE entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en fincas con sombrero medio, seguido de fincas de sombrero bajo, y menor en fincas de sombra alta, (2,8; 2,6 y 1,6 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, respectivamente). Existen diferencias significativas ($p = 0,0184$) para la interacción nivel de sombrero y mes de muestreo, siendo mayor la eficiencia de uso del agua en el muestreo S para los niveles de SM y SB. La menor eficiencia se presentó en el muestreo LI en la condición de SA. (Figura 16).

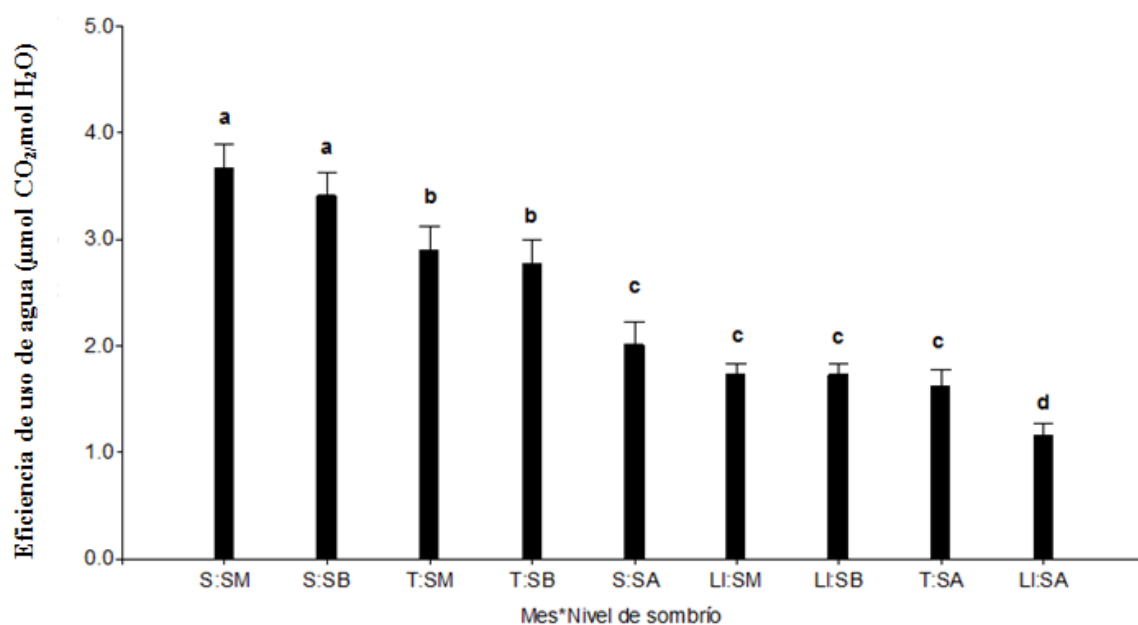


Figura 16. Eficiencia de uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$) en tres periodos de muestreo: S (seco), T (transición), LI (lluvioso) y bajo tres niveles de sombrero: SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja). Las barras verticales en cada columna representan el error estándar. Letras diferentes encima de las columnas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Las fincas en condición de SM presentaron mayor asimilación de CO_2 por unidad de agua transpirada seguido de la condición de SB, en las fincas de SA los resultados fueron menores; esta eficiencia se correlaciona directamente con la radiación y la humedad relativa; por lo tanto, aunque la planta adquiere CO_2 para la fotosíntesis, el agua se pierde

por transpiración también, y estos intercambios varían con el gradiente de potencial hídrico entre la hoja y la atmósfera (Silva y Silva, 2007).

Adicionalmente, la mayor eficiencia en el uso del agua se presentó en el muestreo S y el menor valor se presentó en el muestreo LI, esto concuerda con lo enunciado por Gómez (2000), que realizó un estudio sobre la respuesta fotosintética de plantas de café al nivel de humedad del suelo en Chinchiná, Caldas, determinando que la planta presentan mejor eficiencia en el uso del agua en condiciones de estrés hídrico que en un estado de saturación de agua en el suelo, ya que cuando se presenta exceso de H₂O, los poros del suelo carecen de oxígeno, lo cual afecta el movimiento del agua en la planta y por ende altera la actividad fotosintética de los cafetos.

En la época de muestreo lluviosa, las plantas de café se encontraban en la fase de floración. Según Cannell, (1985), en la floración de los cafetos se encuentra influenciado por el brillo solar y la distribución de las lluvias. En un estudio realizado por Ramírez et al. (2010) en diferentes zonas cafeteras de Colombia, determinaron que las precipitaciones altas y prolongadas, las temperaturas altas de noche o bajas de día disminuyen la floración en el café, además en las zonas donde el brillo solar es bajo (inferior a 7,2 h/día) requiere de un mayor déficit hídrico para inducir la floración

6.3.9. Relación entre las variables ecofisiológicas, periodos de muestreo, niveles de sombrero

En el análisis de componentes principales el eje x del primer componente explica el 50,5% de la variabilidad de los datos evaluados, mientras que el eje y del segundo componente explica el 29,8%, para un total de 80,3%. En el componente 1 existe una correlación positiva entre la asimilación neta, la conductancia estomática, la transpiración el déficit de presión de vapor, y la temperatura de la hoja, el rendimiento cuántico y el carbono subestomático, y una correlación negativa de estos componentes con las variables radiación transmitida, radiación incidente, eficiencia del uso del agua y humedad relativa.

En el componente 2 se encuentra correlacionados positivamente la humedad relativa, la eficiencia del uso del agua, radiación incidente, radiación transmitida la temperatura ambiente, la asimilación neta, conductancia estomática, y una correlación negativa con el carbono subestomático y el rendimiento cuántico.

Los sistemas productivos con tipología de sombra baja y sombra media en la época lluviosa demostraron ser mayormente eficientes en los procesos fisiológicos, mientras que los cafetales establecidos en condición de sombra alta en la época de muestreo de transición y seca no son eficientes.

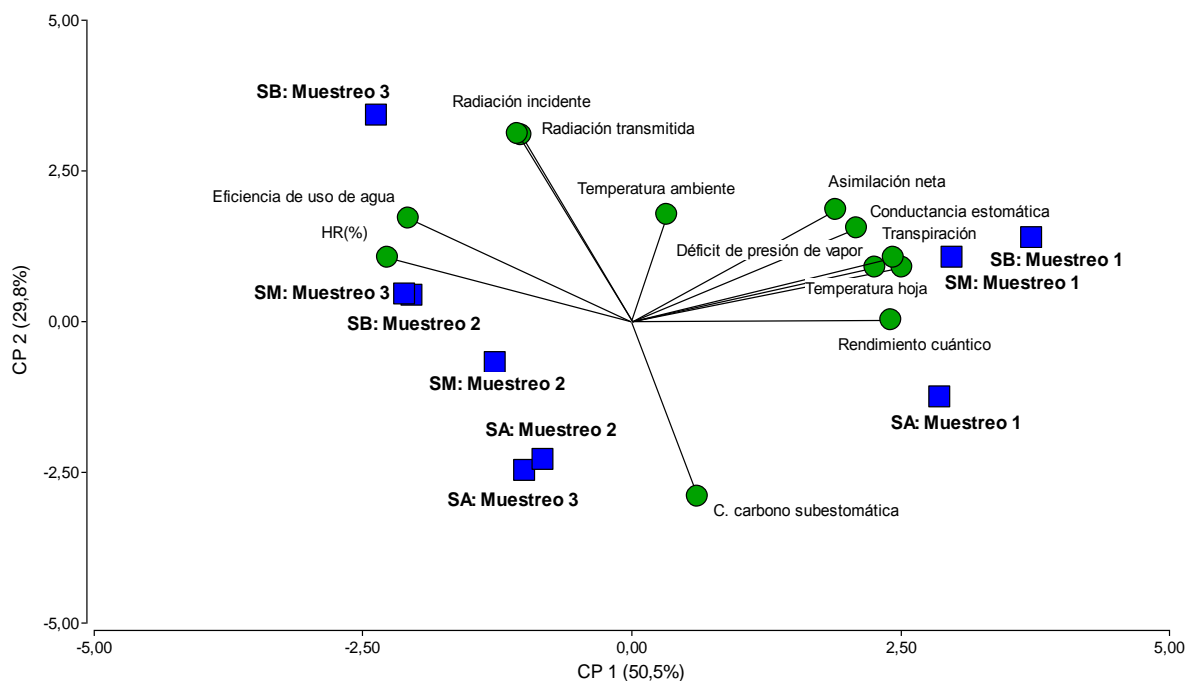


Figura 17: Relación entre las variables ecofisiológicas, periodos de muestreo, niveles de sombrero, SA (sombra alta), SM (sombrero medio), SB (sombra baja) en sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca.

Según Castillo et al., (1997) la eficiencia en la fisiología de los cafetos se encuentra relacionada con la interceptación de luz, interceptación de energía incidente y su conversión en biomasa. De acuerdo a lo anterior en éste estudio se observó que en la época lluviosa, a pesar de que la cantidad de PARi fue menor comparada con el periodo de T y Ll, la cantidad de horas luz recibidas por los cafetos fue superior en el muestreo lluvioso, esto

influyo de manera positiva ya que la cantidad y la calidad de radiación interceptada por las plantas de café en esta época, afecto positivamente procesos fisiológicos como la conductancia estomática, la asimilación y la transpiración en las tipologías de SB y SM.

Las mayores tasas de asimilación neta de CO₂ presentadas en los cafetos evaluados en las condiciones de SB y SM pueden ser atribuidas a la disponibilidad de PARi en comparación con las fincas con tipología de SA, la disponibilidad de radiación se correlacionó positivamente, con la conductancia estomática, la transpiración, esto indica que el exceso de sombra es una condición que afecta en mayor medida los procesos fisiológicos de los cafetos que la exposición de las plantas a niveles superiores de sombrero. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Jaramillo y Gómez (1989) que indican que en Colombia es usual que los cafetales con bajos o nulos niveles de sombrero sean mayormente eficientes en sus procesos fisiológicos debido a las condiciones de nubosidad de las zonas cafeteras las cuales pueden disminuir la radiación incidente hasta en un 50%, además afirma que son pocas las hojas del árbol adulto las que se encuentran a plena exposición solar, ya que el auto y mutuo sombrero reducen la intensidad lumínica lo cual provoca una regulación en la temperatura de las hojas.

En los periodos de transición y seco los sistemas productivos evaluados se encontraban en la fase de fructificación. Según Canell y Huxley (1970), para la formación y desarrollo de los frutos las plantas requieren una alta demanda de asimilados, por lo cual el suministro de estas sustancias producidas por las hojas es empleado para el desarrollo de estos órganos. Dada esta condición es posible que esta fase se encuentre relacionada con la reducción de la actividad fotosintética de las hojas evaluadas en estos muestreos, ya que disminuye significativamente la proporción de asimilados destinados para el crecimiento de los órganos vegetativos. (López et al., 2010).

En la época seca en las tipologías de SA y SM las variables que presentaron correlaciones positivas fueron el uso eficiente del agua y la humedad relativa, esto indica que las plantas en condiciones moderadas de sombrero son más eficientes en el uso del agua cuando se encuentran sometidas a perdidos de déficit hídrico. Esto coincide con lo reportado por

Gómez (2000) que atribuye la eficiencia en el uso del agua a la relación entre la cantidad de oxígeno y agua presentes en los poros del suelo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los cafetales bajo sombrero medio presentaron una mayor adaptación a las condiciones ambientales del municipio de Tibacuy Cundinamarca frente a fincas de sombrero bajo, presentando una PARI cercana al punto de saturación para plantas de café establecidas bajo sombra (300 y 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), además se registraron valores superiores en la conductancia estomática, tasa de transpiración, eficiencia en el uso del agua y de la radiación, y menor déficit de presión de vapor, lo que representa una oportunidad para incrementar la cobertura arbórea en los sistemas cafeteros del municipio.

En fincas con sombrero alto (48 -50%), se registró menor eficiencia en los procesos fisiológicos de los cafetales evaluados, ya que se evidenció menores tasas de fotosíntesis, eficiencia en el uso de la radiación y eficiencia en el uso del agua.

La mayor eficiencia en el uso del agua en cafetales de sombrero medio frente a cafetales de sombrero bajo y alto y especialmente durante la época seca, es una característica importante que debe tenerse en cuenta en términos de adaptación de los sistemas cafeteros frente al cambio climático.

En la interacción mes de muestreo – condición de sombra se destacó el periodo Lluvioso junto con la condición de sombra media, ya que la asimilación de CO_2 fue mayor y la relación con las demás variables estudiadas fue más favorable, eso puede atribuir a la mayor disponibilidad de agua y brillo solar para los cafetos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda la implementación de sistemas agroforestales diversificados, distribuyendo la cobertura arbórea homogéneamente entre el cultivo, en un rango de 21 y 41% de sombra, ya que este porcentaje de sombra favorece los procesos fisiológicos que regulan la asimilación neta de CO_2 en las planas de café, lo cual se traduce en una mayor producción de materia seca y por ende el aumento en el rendimiento del cultivo.

Realizar prácticas de manejo como podas y raleos para los individuos arbóreos asociados a los cafetales en la condición de SA, con el fin de disminuir el porcentaje de sombrío, y aumentar la radiación que puedan interceptar las plantas para incrementar la productividad de estos cultivos.

8. REFERENCIAS

Alcaldía Municipal de Tibacuy. (2008). Plan de Desarrollo Municipal: “Todos unidos por el desarrollo de Tibacuy” 2008-2011. Consultado el 14 de septiembre de 2014. Disponible en: http://www.tibacuy-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml.

Alvarado, Posada y Cortina. (2005). Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la Roya, Avances técnicos CENICAFE, Vol 307. Pp 1-7.

Anacafé (2012) La sombra en el café; Anacafé, Asociación Nacional de Café; Guatemala; Fuente: https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_Sombra#Cantidad_y_calidad_de_la_luz_solar

Andrade, H., Marín, L. y Pachón, D. (2014). Fijación de carbono y porcentaje sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arábica* L.) en Líbano, Tolima, Colombia. Bioiagro Vol 26. Pp 127-132.

Angrand, J. (2002). Floración, desarrollo vegetativo y fotosíntesis de *Coffea arabica* L. en diferentes sistemas de cultivos en Pérez Zeledón y Heredia Costa Rica.

Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L., Hincapie, E. (2007) Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Colombia. Cenicafé

Beer, J. (1987). Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* 5(1):3-13.

Barros, R., Maestri, M., Coons, M. (1978). The physiology of flowering in coffee: a review. *Journal of Coffee Research* 8(2-3):29-73.

- Barros, R., Mota, F., Damatta., Maestri, M. (1997). Decline Of Vegetative Growth In *Coffea Arabica* L. In Relation to Leaf Temperature, Water Potential And Stomatal Conductance. *Field Crops Res.* 54, 65-72.
- Botero, E., Farfán, F. (2004). Organic coffee production: A producer country perspective Colombia. En: INTERNATIONAL IFOAM Organic coffee conference. (3 : Octubre 6-8 2004 Kampala). Kampala: ICO.
- Camayo V., Chaves C., Arcila P., Jaramillo R. (2003) Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná - Caldas. *Cenicafé* 54 (1): 35-49.
- Cannell M., Huxley. P. (1970). Seasonal differences in the pattern of assimilate movement in braches of *Coffea Arabica* L. *Analisis Applied Biology*. Vol 64. Pp 345-357
- Cannell, M., (1985). Physiology of the coffee crop. In Clifford, NM; Wilson, KC (eds), *Coffee: Botany, biochernisty and production of beans and beverage*. Coom, Helm, London, pp 108-134.
- Castillo Z., López A. (1966) Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del cafeto. *Cenicafé* 17(2):51 - 60.
- CASTILLO R., M.E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. (1997). Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar del *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 48(3):182-194.
- Cenicafé. (2001). Crecimiento del cafeto en diferentes altitudes. Cuantificación de la floración, cuajamiento y desarrollo del fruto en las Subestaciones Experimentales.

- In: Resumen Informe Anual de Actividades Cenicafé. Chinchiná, Cenicafé, - p.37 – 38.
- Cenicafé (2005). CASTILLO: Nueva variedad de café con resistencia a la roya, Avances Técnicos Cenicafé. Vol 337. Pp 1-8.
- Cenicafé (2009). Sombrío para el cultivo de café según la nubosidad de la región. Avances Técnicos Cenicafé, Col 379. Pp 1-8.
- Cenicafé (2012). Variedad Castillo. Preguntas frecuentes, Avances Técnicos. Cenicafé. Vol 426. Pp 1-12.
- Cenicafé (2013). Manual del cafetero Colombiano. Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Cenicafe Tomo 1. Pp 205-238.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (2009). Proyecto de captura de carbono.
- Convenio 009 de (2014). Anexo Técnico. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales UDCA.
- Covarrubias Robles, A. 2007. Sobrevivir al estrés: cómo responden las plantas a la falta de agua. Biotecnología V14 CS3.indd 262. Disponible en: http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/libro_25_aniv/capitulo_22.pdf
- DaMatta, F.M. y A.B. Rena. (2002). Ecofisiología de cafézais sombreados e a pleno sol. En: Zambolim, L. (ed.). O estado da arte de tecnologías na produção de café. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. pp. 93-135.
- DaMatta, F.M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. Field Crops Res. 86, 99-114.

- DANE. (2013), Boletín de prensa Cuentas Nacionales Trimestrales – Producto interno Bruto. Recuperado 28 de septiembre de 2013: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bolet_PIB_Itrim13.pdf.
- Dedecca, D. (1957). Anatomía e desenvolvimiento ontogenético de *Coffea arabica* L. Var. *Typica* Cramer. *Bragantia* 16:315-366.
- De la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, y A. Rodríguez. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación en papa estimada a partir de la cobertura del follaje. *Agriscientia* 28: 21-30
- Di Rienzo JA, Balzarini M, Gonzalez L, Casanoves F, Tablada M, Robledo CW, 2009. *InfoStat*. Versión estudiantil. <http://www.infostat.com.ar>.
- FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia. Pp 1-3
- FAO. (2012). Los SAF y la lucha contra el cambio climático. *Sistemas agroforestales, seguridad alimentaria y cambio climático en centro américa*. 66 – 71 pp.
- Farfán, F & Cenicafé. (2012), Arboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café. Chinchiná, Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia- CENICAFE.
- Farfán, F. (2014) Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Manizales, Caldas. CENICAFÉ.

- Federación Nacional De Cafeteros de Colombia. (2013). Informe de comité departamental de cafeteros de Cundinamarca. Recuperado el 14 de septiembre de 2014: <http://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Cundinamarca1.pdf>.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café "Cenicafé". 2015. Precipitación y brillo solar estación climática de la Granja Tibacuy para el periodo enero a julio de 2015. Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia.
- Fernández, E. Camacho, F. (2005). Concepto y aplicaciones en prácticas en horticultura y semilleros. Eficiencia en el uso del agua. Recuperado el 2 de marzo de 2016: http://www.horticom.com/revistasonline/extras/2005/E_Fernandez_F_Camacho.pdf
- Friend, D. (1984). Shade adaptation of photosynthesis in *Coffea Arabica*. *Photosynthesis Research* 5(4):325-334.
- García, C, Sabate, C. (2011). ECOLOGIA FORESTAL: Estructura, funcionamiento y producción de las masas forestales. Recuperado el 18 de octubre de 2014: http://www.ub.edu/ecologia/Carlos.Gracia/Ecolog%C3%ADa_Forestal.htm
- Gardner, F. Brent, P., Mitchel, R. (1985). Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Pp. 31-57.
- Gómez L (2000). Metabolismo del carbono y relación fuente demanda en el cafeto (*Coffea arabica*. L). Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencia Agropecuarias, Área agraria. P 208.
- IDEAM (2010). Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. 70 p.

IDEAM (2015). Anuario climático 2015. Recuperado el 02 de mayo de 2016:
<http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos>

IGAC Y CORPOICA (2002). Uso adecuado y conflicto de uso de las tierras en Colombia.
Bogotá. IGAC

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change 2001: Climate change systems report: A
summary for policymakers. IPCC. Wembley, UK.

Jamil, C., Teixeira. F. (2006). Photosynthesis of individual leaves in a coffee plant.
Maringá, *Vol* 28. pp 331 – 335.

Jaramillo R. & Gómez G. (1989). Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo
sombrio. *Cenicafé* 40(3):65-79.

Jiménez. F., Vargas. A. (1998). Apuntes de clase del curso corto: Sistemas agroforestales.
Turrialba Costa Rica. Proyecto Agroforestal CAATIE/GTZ.

Kandji, S. T., Verchot, L. V., Mackensen, J., Boye, A., van Noordwijk, M., Tomich, T. P.,
Ong, C., Albrecht, A. y Palm, C. (2006). Opportunities for linking climate change
adaptation and mitigation through agroforestry systems. En D. P. Garrity, A. Okono,
M. Grayson, y S. Parrott (Eds.), *World agroforestry into the future* (pp. 113-121)
[Versión electrónica]. Nairobi: World Agroforestry Centre. Obtenido el 23 de marzo
de 2015 en
<http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFs/bc06137.pdf>

Kaulen, H., Penning V., Dreess, EM. 1982. A summary model for crop growth. In: Penning
de V., F.W.T., Laar, H.V. Eds. *Simulation of plant grow and crop production*.

Wageningen, Nederland. Centre for agricultural publishing and documentation, p 87. P

Kanechi, M. Uchida, N., Yasuda, T., Yamaguchi T. (1995), Water stress effects of *coffea arabica* L. under different irradiance conditions. In; Colloque Scientifique international sur le Café. P520 – 527, Paris.

Kopsell, E. & Jiménez, F. (2001). Función y aplicación de sistemas agroforestales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Turrialba, Costa Rica. 192 p.

Kumar D y Tiesten L. (1976). Some aspects of photosynthesis and related processes in *coffea arabica*. Kenya coffee. p309 315

López, J. (2004). Comportamiento del intercambio gaseoso de *Coffea arabica* L. en tres altitudes de la zona cafetera central colombiana, *Cenicafé* Vol 55(3) Pp 202-212.

López, A. (2010). Observación sobre granos anormales de café y su ocurrencia en diferentes sitios de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*. Pp 77-88

Mariño, Y.A. 2014. Respuesta fotosintética de *Coffea arabica* L. a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica*. vol.63 no.2. Palmira, Colombia. ISSN 0120-2812

Mota C.; López, C.; Ilesias, M.; Ballesta M.; Carvajal, M. (2011). Investigación Sobre La Absorción De Co2 Por Los Cultivos Más Representativos de la Región de Murcia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Murcia, España. ISSN 2173-5042, N°. 294, págs. 58-63

Naciones Unidas. (2016). Resumen de lo anunciado por líderes mundiales en la COP21. Recuperado 12 de febrero de 2016. <http://newsroom.unfccc.int/es/paris/resumen-de-los-anuncios-del-dia-de-los-lideres-en-la-cop21/>

Nair, R. (1993). Introduction to Agroforestry. Gainesville, Florida, USA. Dordrecht Kluwer Academic Publishers.

Nutman, F. (1937). Studies of the physiology of *Coffea Arabica*. I. Photosynthesis of coffee leaves under natural conditions. Annals of Botany. Pp 354-367.

Organización Meteorológica Mundial (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra, Suiza. OMM.

PNUD. (2010). El Cambio Climático en Colombia y en el Sistema de las Naciones Unidas: revisión de riesgos y oportunidades asociadas al cambio climático. ONU. Bogotá, Colombia. 8 p.

Ppsystems. (2013). Manual Ciras. Recuperado del 03 de diciembre de 2015. <http://ppsystems.com/wp-content/uploads/EDSCIRAS3.pdf>

Rodríguez, M. (2009). Cambio climático: lo que está en juego. Recuperado 02 de diciembre de 2015. <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/07216.pdf>.

Sáenz, J. (2012). Reducción y Fijación de CO₂. La fotosíntesis, concepciones, ideas alternativas y analogías. Unidad didáctica dirigida a estudiantes de los ciclos 3 y 4 de educación básica del Colegio José María Carbonell, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado 04 de febrero de 2016. <http://www.bdigital.unal.edu.co/7577/1/jorgeenriquesaenzguarin.2012.pdf>

Secretaría de planeación de Cundinamarca (2013). Estadísticas Básicas Provincias del Sumapaz. Recuperado 09 de marzo de 2016.

<http://www.cundinamarca.gov.co/wps/wcm/connect/de54058f-66d9-4ee2-838f-4b423ad223cb/Sumapaz.pdf?MOD=AJPERES>

Siles, P. (2001). Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucaliptus deglupta* Blume, *Terminalia ivorensis* A. Chev y son sombra. Recuperado 05 de enero de 2016: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0402e/A0402e.pdf>

Silva, A., Silva, J (2007). Tópicos em manejo de plantas daninhas. Viçosa, MG. EditoraUFV. p 367

Shoeder, I., Allen, G., Hugouvieux, V., Kwak, J., Warner, D. (2001). Guard cell signal transduction. Annual review of Plant Physiology. Vol 52. Pp 627-658.

Tio, M. (1962) Effect of light intensity on the rate apparent photosynthesis in coffee leaves Journal of the Agriculture of the University of Puerto Rico. 46: 66-159

Tracy, M y Hernández, I. (2005). La transpiración - Movimiento del agua a través de las plantas. Recuperado 01 de febrero de 2016: <http://passel.unl.edu/pages/informationmodule.php?idinformationmodule=1123617035&topicorder=1&maxto=8&mintto=0>

Van N; Hairiah, K. (2000). Tree-soil-crop interactions. Bogor, International Centre for Research in Agroforestry-ICRAF. 12 p. (Lecture Note 2).

Wormer, T. (1965). The effect to soil moisture, nitrogen fertilization and some meteorological, factors on stomatal aperture of *Coffea arabica*. L. Annals of Botany. Vol 20. Pp 108-134.