UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sede Villa Corzo

Efecto fisiológico del nivel de exposición solar en algunos indicadores del régimen hídrico de cafetos (*Coffea arabica* L) en condiciones semicontroladas

Tesis profesional

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AGROFORESTAL

PRESENTAN

Daudiel Pérez Trejo

Luis Beltrán Molina Mejía

Villa Corzo, Chiapas, 23 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Sede Villa Corzo

Efecto fisiológico del nivel de exposición solar en algunos indicadores del régimen hídrico de cafetos (*Coffea arabica* L) en condiciones semicontroladas

Tesis profesional

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AGROFORESTAL

PRESENTAN

Daudiel Pérez Trejo

Luis Beltrán Molina Mejía

Director de Tesis

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi

Codirector de Tesis

Dr. Miguel Ángel Salas Marina

Villa Corzo, Chiapas, 23 de mayo de 2019

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD

Villacorzo, Chiapas
14 de Mayo de 2019

C. Daudiel Pérez Trejo

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniero Agroforestal

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Efecto Fisiológico del nivel de exposición solar en algunos indicadores del régimen hídrico de cafetos (*coffea arabica L*) en condiciones semicontroladas

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores	**Firmas:**
Dr. Wel Olvein Cruz Macías	
Dr. Miguel Angel Salas Marina	
Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi	

Ccp. Expediente

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión

SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD

Villacorzo, Chiapas
14 de Mayo de 2019

C. Luis Beltrán Molina Mejía

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniero Agroforestal

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Efecto Fisiológico del nivel de exposición solar en algunos indicadores del régimen hídrico de cafetos (*coffea arabica L*) en condiciones semicontroladas

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores	**Firmas:**
Dr. Wel Olvein Cruz Macías	
Dr. Miguel Angel Salas Marina	
Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi	

Ccp. Expediente

Dedicatoria

Daudiel:

Dedico este trabajo primeramente a dios quien con su bendición se me ha hecho posible esta investigación.

A mis padres, Gonzalo Pérez González, Ilda Trejo Vázquez; quienes en todo momento estuvieron apoyándome para que pudiera concluir la formación como profesional.

Equipo de trabajo: también dedico esta investigación a los compañeros que colaboraron en nuestros muestreos para ser posible esta investigación.

Luis Beltrán:

A Dios, por ser mi guía y por no abandonarme en los momentos más difíciles que la vida me ha presentado.

A mi madre Patricia del Carmen Mejía Espinoza por apoyarme y ser el pilar de la familia por incluirme los valores y hacerme ver como una persona de bien.

A mi padre Rubén Molina Nucamendi por enseñarme a creer en mí mismo, por apoyarme con su educación, a formarme con respeto y lealtad de la palabra.

A mi hermana Gabriela Molina Mejía por apoyarme a cuidar de mí en cada momento, por sus preocupaciones y estar al pendiente de mí.

A mi esposa Isiria Carolina Montero Martínez por ser mi fuerza para culminar mi trabajo que me servirá como profesionista.

Agradecimientos

Daudiel:

Gracias dios por darme esta oportunidad en la vida de poder concluir con una etapa más en mi vida, por las bendiciones que me das en todo momento y por las fuerzas que me llevaron a concluir la tesis.

Agradezco infinitamente a mis padres, Gonzalo Pérez González, Ilda Trejo Vázquez, primeramente por guiarme a este camino, por todo el apoyo económico. Agradezco de todo corazón a ellos quienes incansablemente lucharon día a día para verme triunfar como profesional, gracias por todo el apoyo brindado.

Agradezco a todas aquellas personas familiares y amigos, sus consejos me sirvieron de mucho durante la formación profesional y hoy es momento de decirles gracias.

Agradezco grandemente al Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi por todo el apoyo en nuestros muestreos y por darnos la oportunidad de trabajar en su área de investigación.

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Salas Marina y el Dr. Wel Olvein Cruz Macias por las correcciones en nuestro trabajo, los que nos sirvieron para realizar un buen trabajo.

Luis Beltrán:

Primeramente a dios por prestarme la vida y por tener a mi familia completa.

A mis padres que me apoyaron en los momentos más difíciles y sobre todo por permanecer siempre conmigo.

Quiero agradecer a mi compañero de tesis, Daudiel Pérez Trejo por ser un gran equipo de trabajo y convivir con el toda la etapa de nuestra formación como ingenieros.

También quiero agradecer al Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi por formar parte de mi proceso como profesionista, por sus enseñanzas y apoyarme constantemente.

Al Dr. Wel olvein Cruz Macías por ser mi revisor y darme los consejos y sugerencias cuando lo necesité.

Al Dr. Miguel Ángel Salas Marina por apoyarme y corregir las cosas que hacían de bien mi trabajo como profesionista.

Tabla de contenido

I. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema de investigación 4

1.2 Novedad científica de la investigación 5

II. OBJETIVOS 6

2.1 Objetivo general 6

2.2 Objetivos específicos 6

2.3 Hipótesis alternativa 6

III. MARCO TEÓRICO 7

3.1. Origen y distribución del café 7

3.2 Importancia económica del cultivo de café 9

3.3 El cultivo de café en México 10

3.4 El cultivo de café en Chiapas 11

3.5 Requerimientos climatológicos para la producción del café 12

3.5.1 La altitud (msnm) 12

3.5.2 La temperatura (°C) 12

3.5.3 La humedad relativa 13

3.5.4 El viento 13

3.5.5 La precipitación 14

3.5.6 La luz 14

3.6 Efecto fisiológico de los niveles de radiación solar sobre el cultivo de café . 15
3.6.1 Transpiración 18
3.6.2 Contenido Relativo de Agua 19
3.7 Efecto de la sombra en el microclima del agroecosistema cafetalero 20
3.8 Efecto de la radiación solar en el contenido de pigmentos fotosintéticos 21
IV. METODOLOGÍA 24
4.1 Sitio de estudio..... 24
4.2 Diseño experimental 24
4.2.1 Fertilización y control de plagas y enfermedades 25
4.2.2 Diseño de muestreos y variables de régimen hídrico 25
4.2.2.1 Microclima..... 25
4.2.2.1.1 Densidad de flujo fotónico fotosintético. 25
4.2.2.1.2 Humedad relativa y temperatura del aire 26
4.2.2.1.3 Temperatura del suelo 26
4.2.2.2 Transpiración 26
4.2.2.2.1 Contenido Relativo de Agua (CRA, %)..... 27
4.2.2.2.2 Concentración de clorofilas 27
4.3 Análisis de la información..... 28
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 29

5.1 Variaciones en la radiación fotosintéticamente activa 29

5.2 Variaciones diurnas de la temperatura del aire y del suelo 34

5.3 Efecto del nivel de exposición solar en la transpiración de plantas de cafetos 36

5.4 Efecto del nivel de exposición solar en el contenido relativo de agua (CRA) 37

5.5 Efecto del nivel de exposición solar sobre el contenido de clorofilas totales 39

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 42

VII. BIBLIOGRAFÍA..... 43

Índice de figuras

Figura 1. Zonas cafetaleras más importantes del mundo (Carvajal, 1984). 7

Figura 2. Variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura del aire en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP). 29

Figura 3. Histograma de frecuencias de los registros de temperatura diurna del aire en los tratamientos de PES y SP. 30

Figura 4. Variaciones diurnas de la humedad relativa del aire en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP) en diferentes fechas de muestreo. 33

Figura 5. Variaciones diurnas del DPV en microambientes de cafetos expuestos a PES y SP en diferentes fechas de muestreo. 34

Figura 6. Variaciones diurnas de la temperatura del suelo en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP). 35

Figura 7. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) de la traspiración en plantas de cafetos expuestas a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (SP). 36

Figura 8. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) del Contenido Relativo de Agua (CRA) en cafetos expuestos a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (SP). 38

Figura 9. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) del contenido de clorofilas en plantas de cafetos expuestos a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (B). 41

Índice de tablas

Tabla 1. Valores medios de radiación solar (PAR, temperatura diurna del aire, humedad relativa (HR) y temperatura diurna del suelo en cada tratamiento de exposición solar. 32

RESUMEN

Se diseñó un experimento en bloques al azar con dos variantes experimentales, Plena exposición solar (PES) y sombra permanente (SP), tres réplicas en invernaderos metálicos cubiertos con malla sombra (50% de sombra) y a plena exposición solar. Cada réplica constó con 24 plantas de cafetos trasplantados en macetas de plástico de 13315.7 cm^3 de volumen con suelo aluvial te textura arenosa. Se usaron plántulas de cafetos (*Coffea arabica* L.) variedad Costa Rica 95. Desde el mes de febrero hasta abril de 2018 se registraron las variables densidad del flujo fotónico fotosintético, comprendido dentro de 40-700 nm (radiación fotosintéticamente activa, RFA), la temperatura diurna del aire, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor (dpv). Las mediciones se realizaron desde las 6:00 hasta las 18:00 horas a intervalos de una hora y de 30 minutos al medio día. En tres plantas seleccionadas al azar se determinó la transpiración, el contenido relativo de agua (CRA, %), el curso diario de la masa foliar específica (MFE) y el contenido de clorofilas. Los resultados muestran que la densidad del flujo fotónico fotosintético fue mayor a PES, mientras que la temperatura diurna del aire y la humedad relativa fueron similares a PES y a SP; sin embargo, la temperatura del suelo fue significativamente mayor a PES que a SP. Se observaron variaciones estacionales del contenido relativo de agua. En tres de los cinco muestreos realizados, se observó un mayor contenido de agua en las plantas de cafetos sombreadas y en sentido general se observaron disminuciones en el CRA en las horas cercanas al medio día. La pérdida de agua por transpiración fue mayor en los cafetos sombreados, probablemente debido a una mayor apertura de los estomas, lo cual

conduce a una mayor asimilación de CO_2 y mayor tasa de fotosíntesis neta, y se corresponde con el mayor contenido de clorofilas registrado en los cafetos sombreados.

I. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos comerciales más importantes en cerca del 70 % de los países de los trópicos húmedos donde se cultiva en 10 millones de hectáreas, siendo la producción mundial de aproximadamente cinco millones de toneladas de café verde, de las cuales el 69 % proviene de variedades de *Coffea arabica* L. (Arcila *et al.,* 2001).

A lo largo de la evolución, las plantas han desarrollado diferentes respuestas y adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones de constante déficit hídrico (Nilsen y Orcutt, 1996). Muchas de estas adaptaciones están relacionadas con una mayor capacidad de tomar agua o con un uso más eficiente de este recurso. Algunas plantas poseen adaptaciones como el desarrollo del metabolismo C4 y del metabolismo ácido de las crasuláceas, que les permiten explotar ambientes más áridos (Black y Osmond, 2003; Lüttge, 2004).

Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Potters *et al.,*2007; Shao *et al.,* 2008). Otro mecanismo de resistencia a nivel fisiológico es el cierre de estomas, estructuras responsables de la mayor proporción de pérdida de agua en las plantas (Taiz y Zeiger, 2006).

Durante el estrés hídrico también se induce la expresión de varios factores de transcripción que median la respuesta de genes a estrés hídrico algunos de los

cuales se unen a secuencias específicas en la región promotora de los genes (Guiltinan *et al.,* 1990; Busk *et al.,* 1997).

Se ha comprobado, por estudios realizados en plantas de café o en otros de importancia económica, que la eficiencia con que un cultivo puede interceptar la radiación solar está altamente relacionada con el crecimiento y las prácticas de cultivo empleados, la distribución de asimilados, cambios fisiológicos y bioquímicos que denotan importantes características de acomodo a altos niveles de irradiancia (Hikosaka y Terashima, 1995; Ramalho *et al.,* 1998; Ramalho *et al.,* 2000 y Caviglia y Sadras, 2001) y la asimilación del nitrógeno y su relación con la fotosíntesis (Ramalho *et al.,* 1999).

Se ha demostrado que las condiciones de iluminación a que son sometidos los cafetales al sol o bajo sombra, modifican las características del microclima (Velasco *et al.,* 2001).

En este sentido, Velasco *et al.,* (2001) mencionan que no se ha demostrado que el cultivo del cafeto a pleno sol tenga un efecto definido sobre la humedad del suelo, cuando se le compara con áreas sombreadas. En estudios realizados en México (Romero *et al.,* 1999) y Colombia (Jaramillo y Chávez, 1999), se ha encontrado mayor humedad del suelo en las áreas bajo sombra, con la particularidad de que en estos ensayos las áreas bajo diferente manejo no han sido contiguas, o sea, se han encontrado en sitios separados espacialmente. En Cuba se ha evaluado la HS en diseños semejantes al de esta investigación con resultados divergentes (Morales *et al.,* 1991; Dell´ Amico *et al.,* 1989), apreciándose mayores niveles de humedad a la

sombra o al sol, coincidiendo estos últimos autores con la respuesta encontrada en este trabajo de mayor humedad del suelo en las parcelas a plena exposición solar. Llama la atención de que estos trabajos coincidentes se han realizado en condiciones de montaña, a diferencia de los obtenidos en condiciones de llano (Morales *et al.,* 1991), por lo que podría plantearse la hipótesis de que existe una interacción entre el efecto del sombreo con la pendiente del área experimental, dado por la capacidad de escorrentía de esta última (Velasco *et al.,* 2001)

De lo anterior se infiere que los estudios de régimen hídrico en plantas de cafetos cultivadas al sol y bajo sombra son de suma importancia debido a que en función de las condiciones climáticas que imperen en dichas condiciones, así será la respuesta del cafeto y su productividad. En este sentido, Rodríguez-Larramendi *et al.,* (2001) demostraron que el café las plantas crecen mejor y tienen un mejor estado de agua y contenido de clorofila en condiciones de luz solar ligera, que indicar la adaptabilidad de las plantas de café a moderadas condiciones de luz solar. La tasa de transpiración más alta al máximo la luz del sol se observaba principalmente al mediodía.

Por su parte, Fahl *et al.,* (1994) estudiaron el efecto de distintos niveles de irradiancia en el crecimiento y la fotosíntesis de plantas jóvenes de cafeto. Sobre la base de sus resultados, concluyen que el cafeto se puede clasificar como una especie facultativa de sombra con atributos de aclimatación al sol. Indicaron, además, que cuando el cafeto se cultiva a pleno sol, desarrolla hojas más gruesas, los cloroplastos contienen menos granas y menos tilacoides por grana, una característica típica de plantas adaptadas al sol.

Lo antes expuesto demuestra la importancia de estudiar las respuestas fisiológicas del cafeto a niveles contrastantes de luz, y si bien es cierto que en la literatura revisada existen diversas evidencias de estudios fisiológicos del café en diferentes condiciones de iluminación, en Chiapas y menos en la región Frailesca no se reportan estudios de esta índole. Si tenemos en cuenta que la respuesta de las plantas a las condiciones climáticas depende de diversos factores, entre ellos la latitud, altitud, tipo de suelos, etc., es necesario e importante investigar la respuesta del cafeto al sol y bajo sombra para así poder recomendar prácticas de manejo agronómico de cafetales sobre la base de indicadores eco-fisiológicos que permitan maximizar la productividad biológica y agrícola del cultivo de café en Chiapas.

1.1 **Problema de investigación**

A pesar de que la región Frailesca es un contexto importante en la producción de café a nivel estatal, aún se desconoce el comportamiento fisiológico del cafeto a niveles contrastantes de radiación solar. Por otra parte, se conoce que, de manera empírica, algunos productores están experimentando con plantaciones a pleno sol o con bajos niveles de sombra. El cafeto, por su origen, es una planta umbrófila, pero con el desarrollo de la cafeticultura a nivel mundial y regional, se han creado nuevas variedades resistentes a la roya, con características morfofisiológicas que difieren de los cafetos arábicos originarios de los bosques de galera de Etiopía. Estas variedades no se han estudiado desde el punto de vista fisiológico en las condiciones de suelo y clima de Chiapas, lo cual pudiera conducir a problemas de manejo tecnológico.

1.2 **Novedad científica de la investigación**

El aspecto novedoso de esta investigación radica en que por primera vez se reportan estudios fisiológicos en plantas de cafetos expuestos a niveles contrastantes de densidad de flujo fotónico fotosintético y valores controlados de temperatura diurna, humedad relativa, humedad de suelo y déficit de presión de vapor. Estos estudios incluyen indicadores de régimen hídrico de las plantas como respuesta a los cambios en el microclima provocado por los niveles de exposición a la radiación solar y sirven de base para recomendar práctica de manejo de la sombra en cafetales.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de dos niveles de exposición solar sobre indicadores del régimen hídrico de plantas de café (*Coffea arabica* L. Var. Costa Rica).

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa, la temperatura del aire, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor (dpv) en el ambiente semi-controlado de cafetos cultivados a plena exposición solar y sombra permanente
- Evaluar los cambios en la transpiración y el contenido relativo de agua en plantas de cafetos crecidas a plena exposición solar y bajo sombra permanente.
- Evaluar las variaciones diurnas del contenido de clorofilas totales en cafetos crecidos a plena exposición solar y sombra permanente.

2.3 Hipótesis alternativa

El nivel de exposición a la radiación solar en cafetos cultivados en condiciones de invernadero modifica las características del microclima y como consecuencia tanto la transpiración como el contenido relativo de agua y la concentración foliar de clorofilas se modifican, lo cual pudiera deberse a un proceso de aclimatación de las plantas al gradiente de radiación solar incidente, la temperatura y la humedad relativa en el ambiente circundante al dosel de las plantas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Origen y distribución del café

La palabra café proviene del antiguo termino árabe *qahwah*, que sirve para designar todas aquellas bebidas extraídas de plantas, como el vino. En el siglo XVII, cuando el café llegó a Europa, se le llamó inicialmente “vino árabe” El árbol de café tiene su origen en Abisinia, en la actual República Democrática Federal de Etiopía, en el nororiente de África. Por su importancia comercial en el mundo sobresalen dos especies de café: la de los cafés arábigos y las de los cafés robustas. La primera especie abarca las tres cuartas partes de la producción mundial y se cultiva esencialmente en el Centro y Sur de América (Mariel *et al.,* 2010).

En la Figura 1, se presenta un mapa de distribución de la caficultura en el ámbito mundial, la cual no ha experimentado mayor cambio.

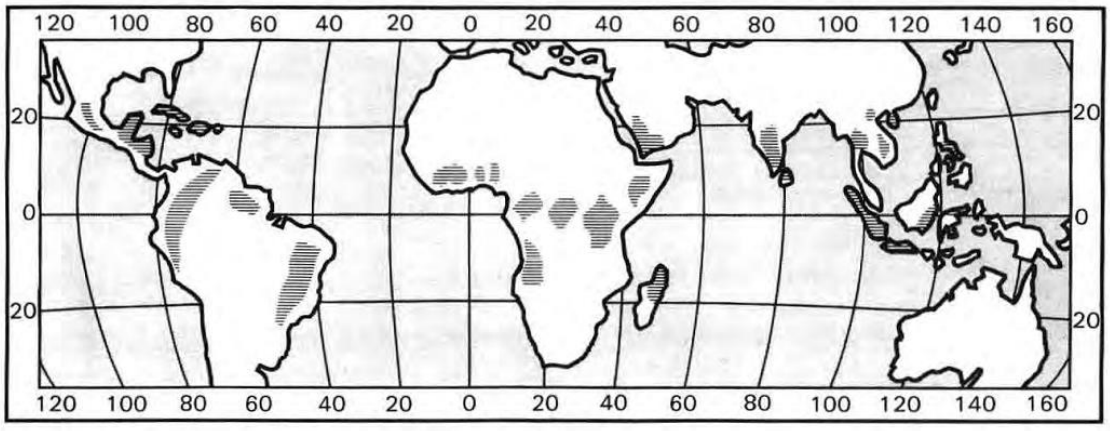

Figura 1. Zonas cafetaleras más importantes del mundo (Carvajal, 1984).

Las regiones del mundo en donde se cultivan las tres especies comercialmente más importantes del genero Coffea exhiben limites ecológicos distintos. No obstante, en algunas localidades, como en la India, el café Robusta y el Arábica se encuentran en un mismo clima. El *coffea arabica* se cultiva entre los 21° de latitud Norte y 25° de latitud Sur del ecuador. El área que abarca el cultivo de las especies *Coffea canephora* o *Coffea liberica* es mucho más restringida y está limitada por latitudes cercanas al ecuador. Estas dos especies son originarias de las tierras bajas de África Central.

Los comentarios de esta bebida llamaron la atención de mercaderes, a los que la experiencia del comercio de las especias les había hecho sensibles a este tipo de información. En el siglo XV, los musulmanes introdujeron el café en Persia, Egipto, África Septentrional y Turquía, la primera cafetería, Kiva Han, abrió en 1475 en Constantinopla, actual Estambul, República de Turquía (Mariel *et al.,* 2010).

El género *Coffea* tiene más de 70 especies distribuidas en África tropical, Madagascar e islas cercanas, todas las especies son leñosas y varían en tamaño y forma de crecimiento (Rena *et al.,* 1994). En este género *C. arabica y C. canephora* son las especies más importantes desde el punto de vista económico y se han extendido como cultivos importantes en la franja intertropical. A pesar de ser África el centro de origen del café y donde aún se le puede encontrar en forma silvestre, sólo produce 12 % del aromático, mientras que en el continente americano se produce 62 %. Brasil es el principal país productor a nivel mundial con 32 % del volumen de producción (Pérez *et al.,* 2011).

3.2 Importancia económica del cultivo de café

La producción cafetalera posee un alto valor económico y social, además la actividad desempeña un papel ambiental importante, ya que su producción se da bajo sistemas que mantienen una cubierta vegetal casi permanente sobre el suelo, reduciendo así los problemas de erosión. La combinación de los beneficios económicos, sociales y ambientales que genera el cultivo del café hace necesaria que los agentes involucrados en el sector promuevan los incentivos necesarios para apoyar la competitividad y crecimiento económico del grano (Flores, 2015).

El café es considerado como una de las materias primas más importantes a las que se les da seguimiento en la economía mundial. Es así que para muchos de los países menos adelantados del mundo, las exportaciones de café representan una parte fundamental de sus ingresos en divisas, en algunos casos más del 80% (Asociación Bancaria de Guatemala, 2012).

La producción cafetalera posee un alto valor económico y social, además la actividad desempeña un papel ambiental importante, ya que su producción se da bajo sistemas que mantienen una cubierta vegetal casi permanente sobre el suelo, reduciendo así los problemas de erosión. La combinación de los beneficios económicos, sociales y ambientales que genera el cultivo del café hace necesaria que los agentes involucrados en el sector promuevan los incentivos necesarios para apoyar la competitividad y crecimiento económico del grano.

El café proporciona las condiciones ideales para la cooperación internacional entre países productores y consumidores, con la cual se asegura una adecuada

remuneración para los productores en tanto provee a los consumidores con café de calidad a precios accesibles (Barrera *et al.,* 2004). El desequilibrio entre la oferta y la demanda ha afectado tradicionalmente el comercio del café, y la corrección de este desequilibrio es un objetivo constante en los foros de cooperación internacional. Actualmente, se tiene un mercado de exportación con una dinámica muy diferenciada, donde se presentan altas exportaciones de café robustas y naturales con una fuerte disminución de las exportaciones de arábicos lavados. Las principales conclusiones de los encuentros internacionales se circunscriben a establecer un sistema de intercambio de información entre países que identifiquen oportunidades y acciones para mejorar las condiciones actuales y futuras del mercado internacional del café (Barrera *et al.,* 2004).

3.3 El cultivo de café en México

Datos proporcionados por Sagarpa (2012) afirman que para México, el café representa una actividad estratégica; emplea a más de 500 mil productores, en cerca de 690 mil hectáreas de 12 entidades federativas y 391 municipios; involucra exportaciones por 897 millones de dólares/año y es el principal productor de café orgánico del mundo, destinando a esta el 10% de la superficie; además, vincula directa e indirectamente a cerca de 3 millones de personas y genera un valor en el mercado de alrededor de 20 mil millones de pesos por año.

Favoreciendo a los estados productores de café, generando un beneficio económico para el sustento familiar y conservación de sus patrimonios naturales.

3.4 El cultivo de café en Chiapas

Chiapas es un estado en el que hoy en día las plantaciones de café están tomando un lugar muy importante en la agricultura ya que es una actividad que no demanda de gran inversión económica, por lo que las personas están adoptando esta alternativa de trabajo y desarrollo económico.

En la investigación realizada por Flores (2015) se cita a ASERCA (2013) donde da a conocer que el sector presenta grandes ventajas en la comercialización ya que existe un uso de variedades híbridas muy reducido, lo mismo que el uso de agroquímicos, factores que son de interés a nivel internacional debido a la tendencia mundial de consumir alimentos sanos. Es posible afirmar que la producción cafetalera de México es prácticamente artesanal y un porcentaje significativo de los productores son principalmente indígenas".

Los estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz son las entidades con el mayor número de productores, en su conjunto agrupan al 74 % de los agricultores dedicados al cultivo del grano, siendo Chiapas el que concentra el mayor número de productores, aproximadamente el 36 %.

Chiapas posee la mayor proporción de hectáreas destinadas al cultivo del café, representa 36 % del total nacional, seguido de Veracruz y Oaxaca, con un 20 y 19 %, respectivamente (Flores, 2015).

3.5 Requerimientos climatológicos para la producción del café

3.5.1 La altitud (msnm)

Basándonos en metodologías clásicas retomamos que en las características del clima influyen los efectos de la luz solar, del viento, de las temperaturas máximas y mínimas, así como el régimen pluviométrico que afecta a cada localidad (Carvajal, 1984).

Entre las variables climáticas que más influyen sobre el cultivo del cafeto (Malavolta, 1962, Carvajal, 1984), afirman que dependen de la altitud (msnm), se encuentra las temperaturas máxima y mínima óptimas para la adaptación del café. Estas variaciones del clima se significan más si tenemos en cuenta que el cafeto se cultiva desde pocos metros hasta aproximadamente los 2000 msnm.

3.5.2 La temperatura (°C)

Jaramillo *et al.,* (2014), cita a Duran (2010), y refiere que el café se produce zonas templadas y calientes, pero la duración de la plantación, cantidad y la calidad de sus productos varían con la temperatura. Cuando ésta pasa de los 23 °C la duración del árbol, la cantidad y calidad del fruto van disminuyendo y a medida que la temperatura sube, aumenta la necesidad de mantener con sombra el café.

Desde los 17 a 22 °C no hay necesidad de sombra. La temperatura más favorable del café es de los 18 a 22 °C, y la calidad de café es superior cuanto menor es la temperatura y menos humedad del suelo. La humedad constante de la atmósfera

favorece más la cantidad que la calidad del producto (Duran, 2010, Jaramillo *et al.,* 2014).

En climas fríos donde la temperatura media es menor de 19 °C, las variedades de café se desarrollan menos, su producción es menor y la cosecha se distribuye a lo largo del año. En climas calientes, donde la temperatura media es mayor de 21.5 °C, la vida productiva del cafeto es más corta, la cosecha más temprana y más concentrada (Duran, 2010 y Jaramillo *et al.,* 2014).

Jaramillo *et al.,* (2014) cita a Sotomayor y Duicela (1993) explicando que las altas temperatura inhiben el crecimiento del cafeto, porque a los 24 °C la fotosíntesis comienza a decrecer y se hace casi imperceptible a los 34 °C.; por esta razón, en zonas muy calientes la sombra es un factor muy importante para moderar las altas temperaturas que producen los rayos directos del sol.

3.5.3 La humedad relativa

Basándonos en un estudio realizado por Jaramillo *et al.,*(2014) cita a Duicela *et al.,*(2003) indicando que la humedad relativa ideal para el cafeto varía de acuerdo a la especie o variedad, en especial el café arábigo se adapta bien a ambientes que se encuentren de 70 a 95 % de humedad relativa.

3.5.4 El viento

Jaramillo *et al.,* (2014) cita a Alarcón (2011) afirmando que el viento es un componente que puede afectar en gran medida al cultivo de café, ya que vientos fuertes pueden dañar el tronco, las hojas y las yemas, y propiciar la incidencia de

enfermedades. El umbral de velocidad para no producir daños físicos y fisiológicos al cafeto es de 20 a 30 km/h.

3.5.5 La precipitación

Según Alarcón (2011) citado por Jaramillo *et al.,* (2014) explica que en un estudio realizado denominado modelo de gestión productiva para el cultivo de café (*Coffea arábica* L.), en el sur del Ecuador, hace referencia que el rango de precipitaciones óptimas para el café varía desde los 1000 a 3000 mm, por lo que es una especie adaptada a diferentes regímenes de lluvia, aguantando incluso épocas no muy prolongadas de sequía. En cuanto a la distribución anual de lluvias se recomienda que haya un rango entre 145 a 245 días lluviosos. Los periodos sensibles a una ausencia de lluvia se encuentran comprendidos, durante el rápido crecimiento del fruto y durante la maduración.

ICAFE (2011) citado por Jaramillo *et al.,* (2014) menciona que la cantidad y distribución de las lluvias durante el año son aspectos muy importantes, para el buen desarrollo del cafeto. Con menos de 1000 mm anuales, se limita el crecimiento de la planta y por lo tanto la cosecha del año siguiente; además, un período de sequía muy prolongado propicia la defoliación y en última instancia la muerte de la planta (ICAFE, 2011).

3.5.6 La luz

La influencia de la luz solar se manifiesta en los vegetales por el efecto de dos variables: a) duración (fotoperiodo) y b) intensidad (irradiación). De estas, la que

más influencia tiene sobre el comportamiento del genero *Coffea* es la intensidad lumínica (Carvajal, 1984).

Según Alarcón (2011) citado por Jaramillo *et al.,* (2014) hace referencia que, en cuanto a la radiación solar, el agente que más influencia tiene sobre el cultivo de café es la irradiación o intensidad lumínica. Un exceso de irradiación provoca una reducción de la fotosíntesis, en cambio, una falta de la misma, implica una mayor incidencia de plagas y enfermedades, así como problemas de maduración y recolección.

Se conoce que plántulas de café se desarrollan mejor cuando desde el vivero hay cerca del 40% de sombra aproximadamente de la luz solar total. Este 40% de sombra varía grandemente de lugar a lugar dependiendo de la altitud, la luminosidad total o diaria de la zona y la formación orográfica general del lugar (Sotomayor y Duicela, 1993 y Jaramillo, 2014).

3.6 Efecto fisiológico de los niveles de radiación solar sobre el cultivo de café

La luz emitida por el sol, denominada comúnmente energía solar, es un componente muy importante para las plantas, debido a que mediante la luz se proveen innumerables beneficios a las plantas que disponen de este recurso. Para este caso hablamos de cafetos donde la energía solar juega un papel muy importante en cuanto al crecimiento y desarrollo de la planta como también influye en algunas cuestiones del estrés hídrico. La energía solar está muy relacionada con la

productividad biológica del cafeto, haciéndolo esencial para producir sus frutos y en su momento interfiere en la disponibilidad o déficit de agua.

En un trabajo de investigación realizado por Felicito (2016) se cita a Valladares (2004) afirman que la radiación disponible influye en numerosos procesos fisiológicos, morfogenéticos y reproductivos de plantas y animales, y afecta de forma significativa al funcionamiento del ecosistema.

En las plantas, la radiación solar cumple un papel esencial al participar en un proceso tan vital, importante y complejo como la fotosíntesis. Para el proceso de la fotosíntesis el bióxido de carbono atmosférico (CO2) y el agua (H_2O) son indispensables, complementados con los iones minerales (Barreiro, 2015 y Felicito, 2016).

Existen investigaciones que demuestran el efecto de la energía solar en cafetales bajo distintos niveles de irradiación, tal caso es el estudio realizado por Rodríguez *et al.,* (1999) donde se trabajó con tres niveles de irradiación: pleno sol (PS) sombra regulada (SR) y sombra no regulada (SNR), donde se obtuvo como resultado que en las fases fenológicas y densidades de plantaciones, la radiación solar se correlacionó negativamente con el área foliar (AF), masa seca foliar (MSF), e Índice de Área Foliar (IAF).

Rodríguez *et al.,* (1999) citan a Benetti *et al.,* (1992) quienes reportan que los estudios referentes al efecto de la radiación solar en el cafeto se han desarrollado fundamentalmente en condiciones controladas con iluminación artificial, limitándose

a afirmar que los niveles óptimos para el crecimiento del cafeto oscilan alrededor del 50 % de iluminación.

Basándonos en un estudio realizado por Rodríguez *et al.,* (2004), citaron a los autores Hikosaka *et al.,* (1995), Saugier (1998), afirmando que la eficiencia con que una plantación es capaz de interceptar la radiación solar es uno de los factores determinantes de la productividad de un cultivo.

Rodríguez *et al.,* (2004), cita a Cannel (1975) quien encontró que la distribución del follaje del cafeto resulta muy eficiente para la interceptación de la radiación, debido a su carácter planófilo y la arquitectura de su ramificación. Sin embargo, en algunas ocasiones las características del ecosistema pueden influir y hasta limitar esta capacidad de la especie.

Existen estudios que nos demuestran las diferencias que existen en distintos niveles de exposición solar, como es el caso de un trabajo realizado por Rodríguez *et al.,* (1999) donde se trabajó con tres niveles de exposición solar, pleno sol (PS), sombra regulada (SR) y sombra no regulada (SNR), donde se obtuvieron resultados diferentes en cuanto a distintas variables del crecimiento vegetativo.

Atendiendo a las fases fenológicas, particularmente la fase de maduración del fruto los efectos depresores de la irradiación solar sobre el crecimiento foliar se evidenciaron más con respecto a la fase de crecimiento vegetativo, mientras que la abscisión foliar también se incrementó durante la fase de maduración de frutos (Rodríguez *et al.,* 1999).

Existen otros autores que demuestran otros efectos en las plantas en relación a la irradiación como es el caso de Carvajal (1984). Por otra parte, Brealy y Carvajal (1971) y Carvajal y López (1965) encontraron en experimentos desarrollados en Costa Rica que el cafeto produce más materia seca y fotosíntesis por unidad de área foliar cuando crece en condiciones de sol.

3.6.1 Transpiración

La transpiración es la evaporación de agua, desde un tejido vivo hacia el exterior. Tal fenómeno puede tener lugar en cualquier parte del vegetal que esté expuesta al aire, pero son las hojas los órganos que lo realizan con mayor intensidad.

La transpiración es muy importante para las plantas, ya que mediante esta acción regulan su temperatura, pero por otro lado la pérdida de agua afecta directamente a la planta provocándole deshidratación.

Basándonos en un estudio realizado por Rodríguez *et al.,* (2001) donde se investigó la transpiración en distintos niveles de exposición solar se lograron identificar los resultados que a continuación se presentan.

El valor de transpiración más alto se observó para 100 % tratamiento de luz solar al mediodía (11:00 h) seguido de 85 y 17 % respectivamente. En ese sentido, algunos de los resultados indicaron que la transpiración en plantas jóvenes de café va aumentada al incrementar la irradiancia en días nublados, pero en los días soleados este incremento no se observó.

3.6.2 Contenido Relativo de Agua

El CRA es la expresión más usada para medir el nivel de agua de un tejido. Es la medida del contenido de agua respecto al total que este puede almacenar; se expresa como porcentaje y permite conocer el estado hídrico de la planta (Argentel *et al.,* 2006).

Estudios realizados por Rodríguez *et al.,* (2001) en plantaciones de café demuestran que el contenido relativo de agua puede ser diferente en distintos niveles de exposición solar. El contenido relativo de agua puede variar del medio día hasta las 14:00 horas que es donde existen más variaciones climáticas.

Es aceptado que las hojas de café mantienen un alto contenido de agua (más del 90%) en condiciones de campo según Yamasaki *et al.,* (1997) debido al control eficiente de estomas y constitución coriácea de hojas. En ese sentido, patrones diarios similares de CRA en los tres niveles de irradiancia se observaron en la base y 14:00 h, con un ligero aumento en el 70 % de la planta al medio día. El resto de los tratamientos mostraron un patrón similar. Por otro lado, está bien documentado que las estimaciones de CRA se vieron afectadas por los niveles de luz cuando la imbibición tuvo lugar en la oscuridad (Yamasaki *et al.,* 1997).

El CRA más alto se mostró en un 85% de plantas tratadas podría deberse a la menor tasa de transpiración observada bajo esas condiciones, eso podría contribuir a mantener un mejor estado del agua en el momento del máximo de agua demandada, independientemente de la humedad del suelo. En ese sentido los resultados indican que las diferencias en la humedad del suelo no influyen

significativamente en el estado del agua de la hoja, porque del CRA más alto mostrado por la planta fue a pleno sol (Rodríguez *et al.,* 2001).

3.7 Efecto de la sombra en el microclima del agroecosistema cafetalero

La sombra juega un papel muy importante dentro del agroecosistema cafetalero, contribuye a generar un microclima favorable para las plantas y mantiene un ambiente con una temperatura modificada por los mismos arboles de sombra.

Basándonos en trabajos realizados por distintos autores podemos comprender que la sombra influye tanto en el crecimiento como el desarrollo del cafeto. Rodríguez *et al.,* (2015) encontraron que el mayor crecimiento foliar se manifestó en los cafetos expuestos a sombra no regulada (SNR) durante la mayoría de los meses del año. Durante el segundo ciclo de producción, el crecimiento fue similar en ambos niveles de exposición solar, excepto en los meses de enero, febrero y junio, momentos en los cuales los cafetos expuestos a SR desarrollaron hojas de mayor tamaño.

Según Morais *et al.,* (2004), cuando plántulas de cafeto se cultivan a pleno sol, las hojas disminuyen su crecimiento en un 27% en comparación con aquellas que se cultivan al 50% de exposición solar. En este sentido argumentan, que las alteraciones en el crecimiento encontradas en hojas de cafetos expuestos a diferentes niveles de exposición solar pueden atribuirse a variaciones en las concentraciones de los reguladores de crecimiento (Rodríguez *et al.,* 2015).

3.8 Efecto de la radiación solar en el contenido de pigmentos fotosintéticos

Según Manrique (2003) las clorofilas son con toda seguridad los pigmentos biológico más abundante en la tierra y debe su color verde a su capacidad de absorber las fracciones roja y azul de la luz solar, transmitiendo los demás colores cuya mezcla apreciamos en diversos tonos de verde. Las hojas pueden llegar a contener hasta 1 g de clorofila m^{-2}, aunque esta concentración es muy variable entre especies y sobre todo depende, entre otros factores, del estado nutricional, la edad o la historia lumínica previa de la planta.

En el caso de las hojas de sombra y parcialmente de sombra, la ruptura de la clorofila a y de la clorofila b no ocurre a la misma velocidad. Las hojas de sombra o adaptadas a baja intensidad lumínica, poseen cantidades mucho mayores de complejo antena II por lo que consecuentemente poseen valores más bajos para la relación clorofila a/b. En la senescencia el complejo antena II que muestra valores bajos de clorofila a/b de 1,1 a 1,3 se rompe más rápido que el resto de las clorofilas. Esto produce un incremento significativo de la relación clorofila a/b, como se muestra para hojas parcialmente de sombra (Reigosa, 2004, Jaramillo *et al.,* 2014).

Lira (2010), cita a Jaramillo *et al.,* (2014) al explicar que el pigmento más conocido por su capacidad de absorber luz es la clorofila. A pesar de que antiguamente se reconoció al pigmento verde de las plantas como la sustancia responsable de la absorción lumínica en la fotosíntesis y capaz de absorber la luz roja y la azul, no la verde, desde hace mucho se sabe que hay otros pigmentos de diversos colores y que, incluso, la clorofila no es una sustancia simple, sino un grupo de pigmentos

interrelacionados, también se descubrió que algunas sustancias coloridas de las plantas están fuera de los cloroplastos, difundidas en el citoplasma, presentes en cuerpecillos especiales, a veces como plastos, y a menudo de forma irregular o muy angular, llamados cromatóforos.

En los cloroplastos ocurre la fotosíntesis; por lo tanto, los pigmentos fuera de ellos (en especial las antocianinas azules y rojas, las xantofilas amarillas y algunos carotenos rojo y naranja) no tienen que ver con la fotosíntesis. Además de la clorofila, en los cloroplastos se encuentran varios pigmentos, incluyendo algunas xantofilas y carotenos, con los cuales se han realizado muchos experimentos para saber si intervienen en la fotosíntesis; algunos se encuentran solo en ciertos grupos de plantas, en tanto que otros tienen una distribución casi universal (Lira, 2010, Jaramillo *et al.,* 2014).

En un estudio realizado por Jaramillo *et al.,* (2014) donde se evaluaron tres niveles de exposición solar y un testigo (0%, 30%, 50% 80%) en dos condiciones edafoclimaticas, los resultados confirman que la mayor concentración de clorofilas totales se obtuvo en el tratamiento del 80% de exposición solar; en cuanto a clorofila *a* no presentó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos, y para la clorofila *b* el mejor resultado se observó en el tratamiento de 80% y el menor fue en el testigo con 0% de exposición solar.

Rodríguez *et al.,* (2001) también demuestran que las plantas de café crecidas a 85% exposición solar mostraron contenidos más altos de clorofilas a, b y a + b, respectivamente, con valores que oscilaron alrededor de 2.01, 1.08 y 2.88 mg × g^{-1}

(peso fresco de la hoja), mientras que se observó menores valores en los niveles de 100 y 70 % de exposición solar, sin diferencias significativas entre los últimos.

Los resultados mostrados hasta aquí, indican que el café muestra patrones de aclimatación a diferentes niveles de radiación solar. A pesar de ser originario de clima sombreado, las plantaciones comerciales se han extendido a diversas latitudes y altitudes. En Brasil, por ejemplo, las plantaciones de café se desarrollan óptimamente bajo plena exposición solar, pero a altitudes cercanas y superiores a los 2000 msnm. En otros países como Cuba y México entre otros países, el café crece y produce mejor bajo la sombra que le proyectan otros árboles. A pesar de esto, en los últimos años se han introducido nuevas variedades resistentes a la roya de las cuales no se conoce las respuestas fisiológicas a los niveles de exposición solar y las variables climáticas cuyas variaciones dependen de los niveles de sombra.

En la región Frailesca, por ejemplo, no se reportan estudios fisiológicos que demuestren que el café crezca mejor a la plena exposición solar o bajo sombra permanente. Es por esto que la novedad de esta investigación radica precisamente en que por primera vez se reportan estudios fisiológicos en cafetos de la variedad Costa Rica 95 a niveles de exposición solar y sombra permanente, para generar información básica que contribuya a crear las bases tecnológicas del manejo de cafeto en plantaciones establecidas.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo en el área experimental de la Sede Villa Corzo adscrita a la Facultad de Ingeniería, ubicada en las coordenadas N 16° 09´ 44.22 y O 93° 16´ 37.13 a una altitud de 600 msnm, en la carretera Villa Corzo-Monterrey a 3.5 km de la cabecera municipal. La investigación inició en el mes de febrero y concluyó en el mes de junio de 2018.

El municipio de Villa Corzo se localiza en la depresión central del estado de Chiapas, en los límites de la Sierra Madre, predominando el relieve montañoso con una extensión territorial es de 2,721.68 km², lo que representa el 48% de la región Frailesca y el 5.3% de la superficie estatal, su altitud es de 580 msnm. Su clima varía según la altitud, predominando el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano en las partes bajas y semicálido húmedo en la sierra. La vegetación de este municipio es de selva baja y bosque de pino-encino.

Las principales actividades económicas en Villa Corzo, son la agricultura basándose principalmente en el cultivo de maíz y café, la ganadería y la pesca debido a que en la región frailesca se encuentra la presa de la angostura.

4.2 Diseño experimental

Se diseñó un experimento en bloques al azar con tres réplicas. Los tratamientos consistieron en dos variantes experimentales a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (SP). El tratamiento de PES estuvo se estableció en

invernaderos cubiertos de malla sombra (50 % de sombra), de 3 m de longitud por 2 m de ancho y 2 m de alto. La variante experimental de SP se estableció con dimensiones de 3 m de longitud por 2 m de ancho, expuestas a pleno sol durante todo el período de duración del experimento. Las variantes se establecieron de manera que se evitara el sombreo de los invernaderos.

Se usaron plantas de cafeto de la variedad Costa Rica 95, de 390 días de sembradas en macetas de 0.013 m^3 de volumen. Cada réplica constó de 24 plantas seleccionadas homogéneamente para reducir el error experimental.

4.2.1 Fertilización y control de plagas y enfermedades

Se fertilizaron las plantas el 5 de agosto del 2017, con una combinación de Urea, Fosfato diamónico (DAP) y Cloruro de potasio (KCl) a dosis de 0.5 g de N $planta^{-1}$, 3.4 g de K $planta^{-1}$ y 4.4 g de P $planta^{-1}$ respectivamente.

Se realizó un control químico del minador en el café (*Leucoptera coffella* Green.) con Diazinon 60 EC a una dosis de 1.6 L ha^{-1}.

4.2.2 Diseño de muestreos y variables de régimen hídrico

4.2.2.1 Microclima

4.2.2.1.1 Densidad de flujo fotónico fotosintético.

Desde las 6:00 hasta las 17:00 horas se registraron los valores de densidad de flujo fotónico fotosintético dentro del rango de longitud de onda de 400-700 nm (radiación fotosintéticamente activa, PAR), con un sensor colocado encima del dosel de los

cafetos una vez en cada réplica. Las mediciones se realizaron a intervalos de una hora, una vez por cada mes.

4.2.2.1.2 Humedad relativa y temperatura del aire

Los registros se realizaron con una micro-estación climática acoplada a un Datalogger. Las mediciones se realizaron desde las 6:00 a las 17:00 horas a intervalos de una hora, una vez por cada mes.

4.2.2.1.3 Temperatura del suelo

Con la ayuda de un medidor de temperatura de suelo colocado a una profundidad de 20 cm se determinó la temperatura del suelo en una maceta por cada réplica. Los registros se realizaron cada una hora desde las 6:00 a las 17:00 horas.

4.2.2.2 Transpiración

Se seleccionaron al azar tres plantas por réplica de cada tratamiento a las cuales se les separó una hoja por planta. Las hojas fueron inmediatamente pesadas para determinar la masa fresca inicial (mf_i). Las hojas se colocaron a temperatura ambiente por un período de 15 minutos (t) y se volvieron a pesar para determinar nuevamente la masa fresca final (mf_f) y se colocaron en la estufa a 80 °C durante 72 horas para determinar la masa seca (ms). Posteriormente a ese tiempo, las hojas se pesaron en una balanza analítica Sartorius ® y el cálculo de la transpiración (Tpr) se realizó a través de la siguiente fórmula:

$$Tpr = \frac{PFi - Pff}{(ms)(t)}$$

Tpr: Intensidad de la transpiración (mg (H_2O) $mg(ms)^{-1}$ min^{-1}

Las mediciones se realizaron desde el mes de febrero hasta junio de 2018 una vez cada mes desde las 6:00 hasta las 18:00 horas a intervalos de una hora.

4.2.2.2.1 Contenido Relativo de Agua (CRA, %)

En tres plantas seleccionadas al azar por cada réplica se tomaron tres discos foliares de 0.92 cm^2 de superficie. Los discos fueron inmediatamente llevados al laboratorio y pesados para determinar la masa fresca (MF). Posteriormente los discos fueron sumergidos en agua destilada durante 30 minutos para determinar la masa turgente (MT). Los discos fueron colocados en una estufa durante 48 horas a 80°C para determinar la masa seca (MS). El cálculo del Contenido Relativo de Agua (CRA) se realizó a través de la siguiente fórmula:

$$CRA(\%) = \frac{MF - MS}{MT - MS} \cdot 100$$

Las mediciones se realizaron desde el mes de febrero hasta junio de 2018 una vez cada mes desde las 6:00 hasta las 18:00 horas a intervalos de una hora.

4.2.2.2.2 Concentración de clorofilas

Se seleccionaron tres plantas por réplicas en cada tratamiento a las cuales se les determinó el contenido de clorofilas con un medidor portátil MC-100. En cada planta se realizó una lectura en hojas totalmente expuestas de la parte media de la planta.

Las mediciones se realizaron desde el mes de febrero hasta junio de 2018 una vez cada mes desde las 6:00 hasta las 18:00 horas a intervalos de dos horas.

4.3 Análisis de la información

Para probar las hipótesis del efecto de los niveles de exposición solar sobre las variables microclimáticas, del régimen hídrico de las plantas, así como del contenido de clorofilas, se realizaron pruebas de t de *Student* para muestras independientes. El efecto de las fechas de muestreos se realizó a través de análisis de una vía. La comprobación de los supuestos se realizó a través de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Bartlet. Para estos análisis se usó el software Statistica (Statsoft, 2007).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 **Variaciones en la radiación fotosintéticamente activa**

En la Figura 1 se muestran las variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y de la temperatura del aire plena exposición solar (PES) y bajo sombra permanente (SP) en diferentes fechas de muestreos. Se observaron los mayores registros de la radiación PAR a PES, llegando a alcanzar valores superiores a 1800 µmol m^{-2} s^{-1} al medio día en el tratamiento PES. A la sombra, los valores de PAR alcanzaron máximos que oscilaron alrededor de 900 µmol m^{-2} s^{-1}, los cuales se encuentran por encima de la radiación de saturación para cafetos expuestos y sombreados (Da Matta, 2004).

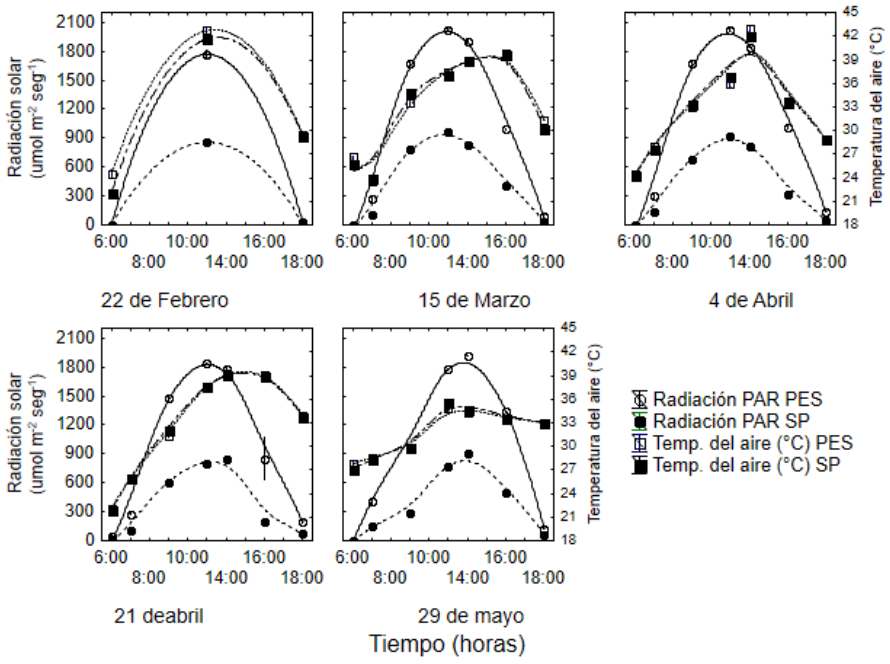

Figura 2. Variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura del aire en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP).

Al respecto se ha demostrado que, para las hojas individuales de café, la radiación de saturación es relativamente baja, oscilando entre 300 y 600-700 µmol de fotones m^2 s^{-1}, con hojas de sombra que muestran los valores más bajos (Kumar y Tieszen, 1980; Fahl *et al.,* 1994). Los valores para una radiación de saturación menores de 300 µmol de fotones m^2 s^{-1} (Rhizopoulou y Nunes, 1981; Friend, 1984; Nunes, 1988) conducen a menor crecimiento de las plantas a niveles extremadamente bajos de radiación solar. En cualquier caso, los valores de la radiación de saturación se han estimado en condiciones experimentales, en las cuales los rayos de luz incidente son normalmente perpendiculares a la hoja Da Matta (2004).

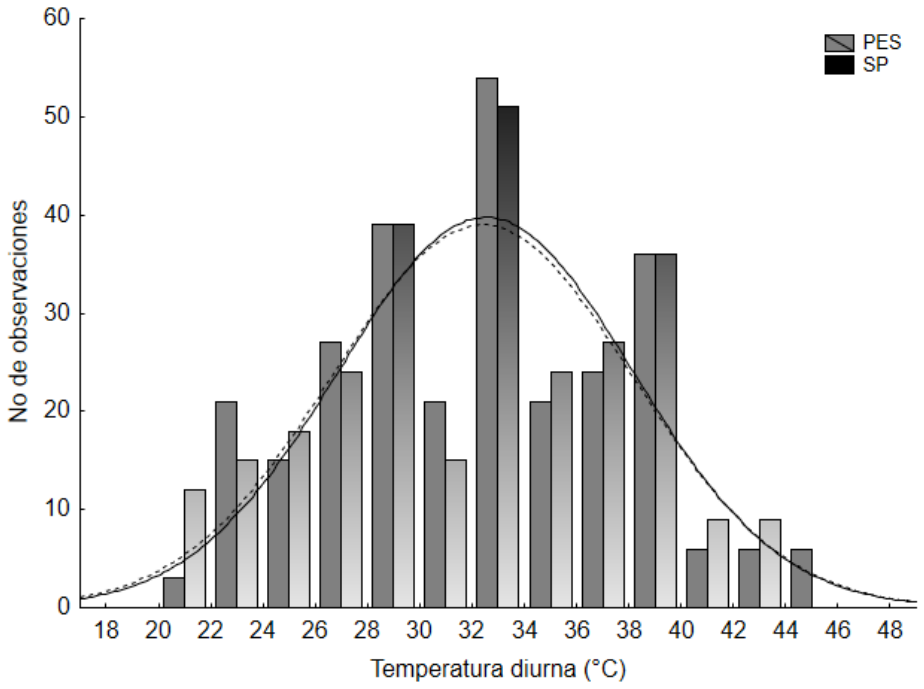

Figura 3. Histograma de frecuencias de los registros de temperatura diurna del aire en los tratamientos de PES y SP.

En cuanto a la temperatura del aire (Figura 1), aunque no se observaron diferencias estadísticas significativas entre las variantes de exposición solar (Tabla 1), los valores registrados oscilaron entre 20 y 45 °C, con los mayores entre 32 y 34 °C (Figura 2). Como era de esperar, se observaron fluctuaciones de la temperatura, con una tendencia a aumentar conforme trascurrió el tiempo con máximos en las horas cercanas al medio día (Figura 1).

Se observó además que una baja proporción de los registros de temperatura, tanto a PES como a SP, se encuentran por encima del rango reportado como óptimo para el cultivo del cafeto, es decir entre 18 y 20 °C (Figura 2), lo cual presupone que la fotosíntesis se podría afectar, tanto a PES como a SP. Al respecto, Barros y Maestri (1977) demostraron que a temperaturas superiores a 24 °C la fotosíntesis en plantas de cafetos disminuye. Da Matta (2004), cita diversos autores y refiere que, al extrapolar los resultados de investigaciones sobre el efecto de la temperatura en el cafeto en condiciones de campo en ambientes tropicales, cuando la temperatura de la hoja alcanza fácilmente valores superiores a 30 °C durante gran parte del día, se llega a la conclusión de que la producción del cafeto sería muy baja a temperaturas relativamente altas. Sin embargo, este no es el caso, como se ha encontrado en Vicosa (650 msnm.), Brasil, donde las tasas de fotosíntesis y crecimiento son máximas durante la estación más cálida del año (Silva *et al.,* 2000).

Tabla 1. Valores medios de radiación solar (PAR, temperatura diurna del aire, humedad relativa (HR) y temperatura diurna del suelo en cada tratamiento de exposición solar.

Fecha	PAR ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)		t	p	Temperatura diurna (°C)		t	p	HR (%)		t	p	Temperatura del suelo (°C)		t	p
	PES	SP			PES	SP			PES	SP			PES	SP		
22/02/2018	598.89	289.78	1.71	0.09	32.25	31.03	0.55	0.58	52.79	51.38	0.62	0.54	33.06	31.05	2.11	0.04
15/03/2018	991.81	447.33	4.75	0.00	32.99	32.93	0.06	0.95	51.86	51.97	-0.05	0.96	31.98	28.38	3.14	0.00
04/04/2018	997.57	419.00	5.22	0.00	32.45	32.37	0.08	0.93	54.00	53.96	0.02	0.98	31.66	28.89	2.90	0.00
21/04/2018	924.76	380.86	5.20	0.00	32.77	32.78	-0.01	0.99	53.83	53.55	0.09	0.92	31.48	27.48	3.32	0.00
29/06/2018	934.00	381.95	5.47	0.00	31.65	31.74	-0.17	0.87	53.97	54.12	-0.15	0.88	31.26	27.83	3.18	0.00

T: Estadígrafo de la prueba de T de *Student*

P: Valor de probabilidad de error.

Las variaciones diurnas de la humedad relativa (HR) a PES y SP en diferentes fechas de muestreos se muestran en la Figura 3. Se observó un patrón de disminución en las horas cercanas al medio día; mientras que, entre las variantes de exposición solar, no se observaron marcadas diferencias. En sentido general, los valores de HR oscilaron entre 35 y 75 %, los cuales se encuentran en el rango recomendado óptimo para el cultivo.

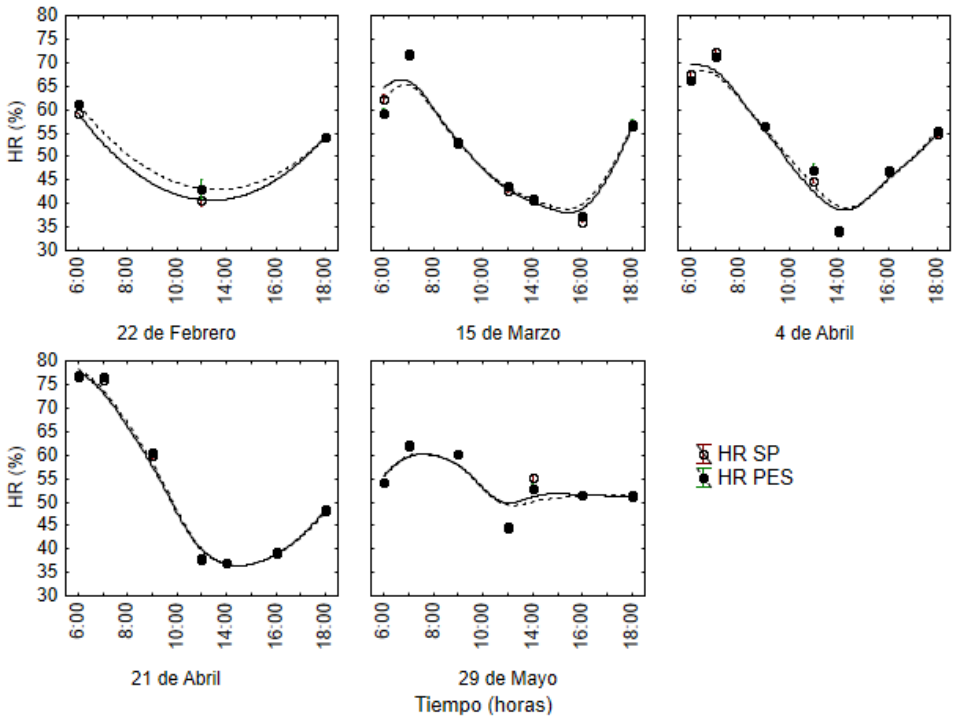

Figura 4. Variaciones diurnas de la humedad relativa del aire en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP) en diferentes fechas de muestreo.

La HR quizás sea la variable menos estudiada en cuanto a la respuesta de los cafetos a cambios en el clima. Al respecto se prefiere estudiar el déficit de presión de vapor (DPV) no sólo por su significado sino también por el efecto en la conductancia estomática. Se ha demostrado que, durante los períodos más cálidos del día, la elevación de la HR parece estimular la apertura de los estomas, particularmente cuando la disponibilidad de agua del suelo no es limitante (Tesha y Kumar, 1978). Al observar las variaciones diurnas del DPV a PES y SP (Figura 4), se corrobora el incremento del DPV conforme aumenta el flujo de fotones (Figura 1). Los valores máximos se observaron en las horas cercanas al medio día y sin diferencias entre los tratamientos, llegando a alcanzar valores superiores a 1.8 kP.

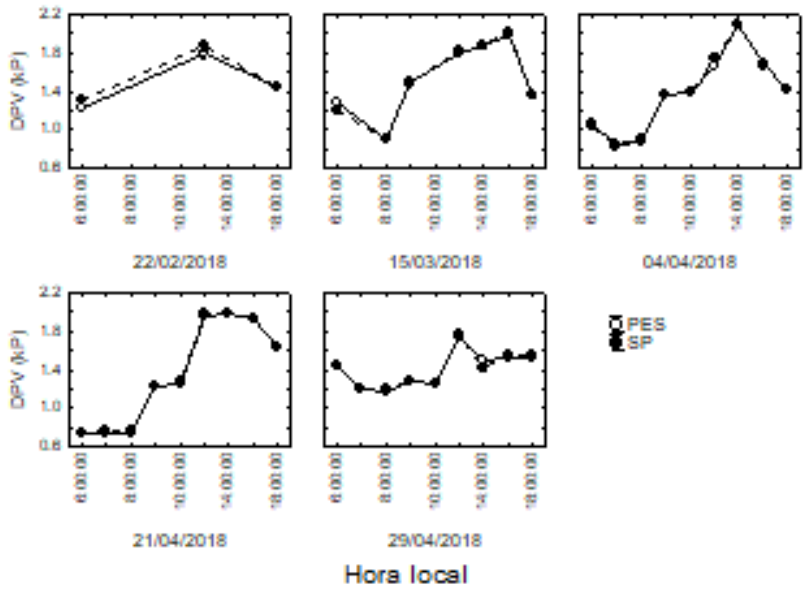

Figura 5. Variaciones diurnas del DPV en microambientes de cafetos expuestos a PES y SP en diferentes fechas de muestreo.

5.2 Variaciones diurnas de la temperatura del aire y del suelo

En la Figura 5, se muestran las variaciones de las temperaturas del suelo para los dos tratamientos, plena exposición solar (PES) y bajo sombra (SP). Las temperaturas mínimas registradas en los distintos meces oscilan en los 22 a 24°C en horas de la mañana (6:00 am), mientras que las temperaturas de suelo máximas se registraron superiores a los 40°C a las 16:00 horas.

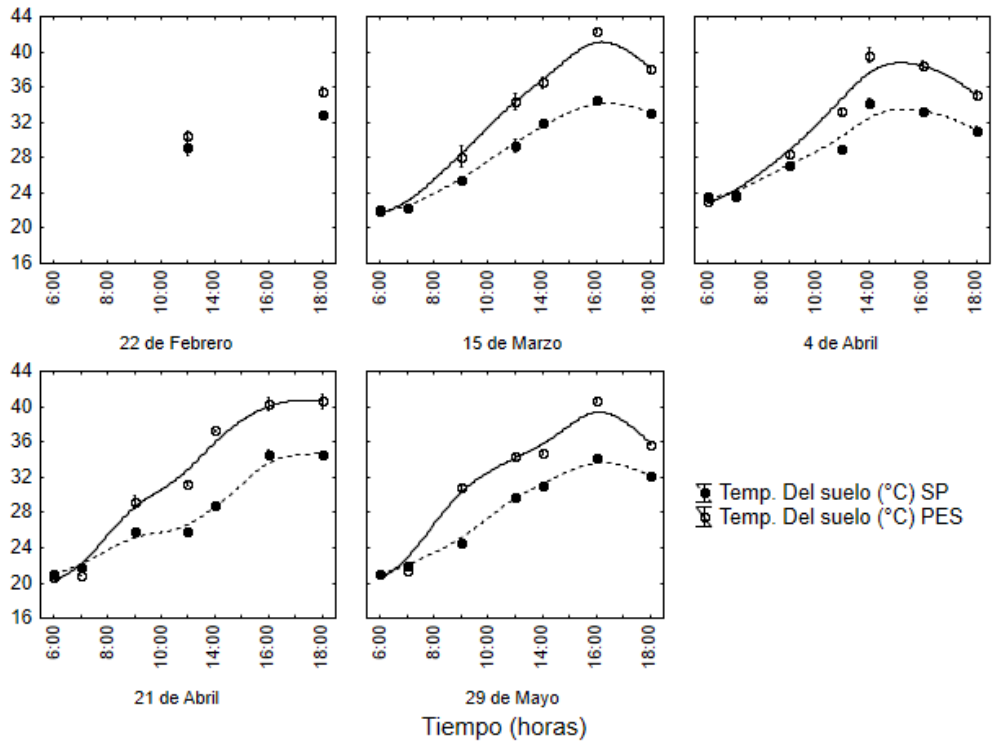

Figura 6. Variaciones diurnas de la temperatura del suelo en condiciones de plena exposición solar (PES) sombra permanente (SP).

La temperatura del suelo mostró una tendencia a incrementar con el tiempo (Figura 5) llegando a alcanza valores cercanos a los 40 °C a las 16:00 horas y disminuyendo a partir de las 17:00 horas. En todos los muestreos realizados, la temperatura fue mayor en el tratamiento de PES, cuya diferencia llegó a ser hasta de 4 °C, lo cual se atribuye al efecto de la radiación solar y coincide con los postulados de Cardona y Sadeghian (2005) quienes encontraron que la temperatura en cafetales a PES es mayor y lo atribuyen al efecto que ejerce la sombra al crear un microclima regulatorio de la humedad y la radiación solar.

5.3 Efecto del nivel de exposición solar en la transpiración de plantas de cafetos

Se observó un efecto significativo del nivel de exposición solar sobre la transpiración en plantas de cafetos, tanto en las variaciones estacionales (Figura 6 A) como en las variaciones diurnas (Figura 6 B). Independientemente de la fecha de muestreo y de manera consistente, se observó una mayor traspiración en los cafetos sombreados (SP) en comparación con los expuestos directamente al sol (PES), en todos los casos con diferencias estadísticas altamente significativas ($p \leq 0.01$).

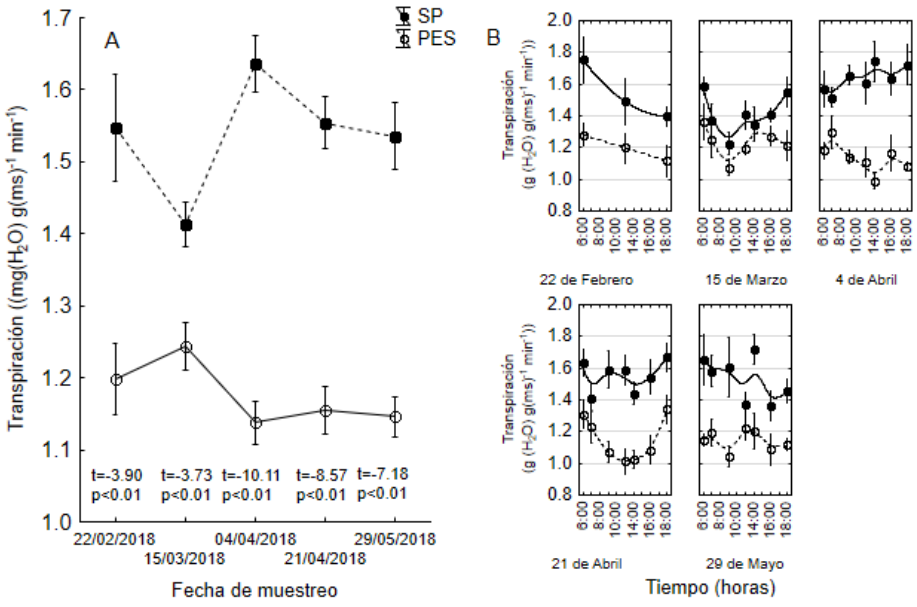

Figura 7. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) de la traspiración en plantas de cafetos expuestas a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (SP).

Se detectaron diferencias significativas en la pérdida de agua por transpiración entre tratamientos dentro de las fechas de muestreo, siendo más marcadas en el tratamiento de SP ($p \leq 0.01$) que a PES ($p \leq 0.10$), lo cual demuestra que la transpiración depende de la fase de crecimiento del cultivo (Figura 6 A). La mayor pérdida de agua por transpiración se observó consistentemente en todos los muestreos en las plantas sombreadas, llegando a alcanzar valores superiores a 1.6 g (H_2O) g$(MS)^{-1}$ min^{-1} el 04 de abril de 2018.

Igualmente, se observaron variaciones diurnas que dependieron de la hora del día (Figura 6 B). Se observó una tendencia a la disminución de la transpiración a partir de la hora base (06:00 h) para luego recuperarse en las horas de la tarde. La diminución más marcada de la transpiración al medio día se observó en las plantas expuestas a PES el 04 y 21 de abril a las 14:00 h. Las plantas de sombra mostraron una capacidad de recuperación de su estatus hídrico (menor pérdida de agua) a partir de las 16:00 h, algo que no sucedió en las plantas expuestas a PES, excepto el muestreo del 21 de abril, lo cual conduce a pensar que el período de recuperación del estrés temporal provocado por la radiación solar al medio día, es mucho más prolongado en las plantas de sol que sombreadas.

5.4 Efecto del nivel de exposición solar en el contenido relativo de agua (CRA)

En la Figura 7 se muestran resultados del contenido relativo de agua a plena exposición solar y sombra permanente, durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo (Figura 7 A), así como las variaciones diurnas (Figura 7 B). Las diferencias estadísticas alcanzaron valores de p cercanos a la significación estadística ($p \leq$

0.05) durante los meses de marzo y abril. Los valores de CRA en los diferentes muestreos oscilaron entre 68 y 80 %, los cuales se consideran valores típicos para plantas de cafetos, aunque se ha documentado que las hojas de café mantienen un alto contenido de agua (más del 90%) en condiciones de campo según Yamasaki *et al.,* (1997), debido al control eficiente de estomas y constitución coriácea de hojas. Esto demuestra por que las plantas de cafetos muestran en condiciones naturales niveles de CRA por encima de 90% y que puede soportar valores de 87% de CRA antes de expresar síntomas de estrés hídrico.

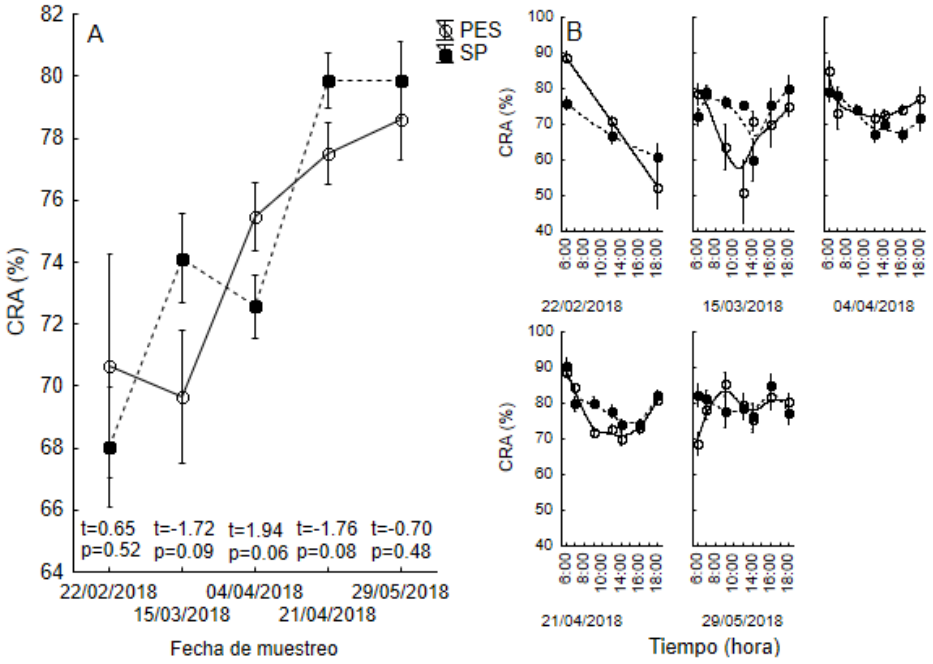

Figura 8. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) del Contenido Relativo de Agua (CRA) en cafetos expuestos a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (SP).

En cuanto a las variaciones diurnas, en ambas variantes experimentales se observó una tendencia a la disminución del contenido de agua foliar durante las horas del mediodía, con una ligera recuperación a partir de las 14:00-16:00 h, excepto en el mes de febrero, momento en el cual se observó en ambos tratamientos una disminución brusca en el CRA, siendo más pronunciada en las plantas expuestas a PES. Llama la atención que los muestreos correspondientes a los meses de febrero a marzo, las plantas expuestas a PES registraron CRA de 50 %, valores que indican pérdida de agua significativa con posibles afectaciones al metabolismo de la planta.

5.5 Efecto del nivel de exposición solar sobre el contenido de clorofilas totales

Se observó un mayor contenido de clorofilas en hojas de cafetos expuestos a PES durante el mes de marzo (Figura 8 A). A partir de ese momento el resultado fue totalmente opuesto, siendo significativamente mayor el contenido de clorofilas en las plantas sombreadas. Estos resultados corroboran los mayores valores de asimilación de CO_2 observados en cafetos sombreados, lo cual corrobora los resultados publicados por Goncalves de Oliveira *et al.,* (2009) citado por Marín *et al.,* (2018), quienes demostraron que un óptimo contenido de clorofila en hojas de café es necesario para el adecuado proceso de fotosíntesis. Encalada *et al.*, (2016) encontraron que el contenido de clorofila fue mayor en las posturas con menor iluminación, siendo el más alto en el nivel de 50 % con diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos. Estos resultados indican que se produjeron cambios morfológicos y fisiológicos como respuesta a la restricción de luz, que evidencian la capacidad de adaptación del cafeto para aprovechar eficientemente la luz disponible.

Por su parte, Rodríguez *et al.,* (2001) reportaron mayor contenido de clorofila a y b a 85 % de exposición solar; la concentración de carotenoides fue similar en las tres variantes mientras que de las relaciones Cl a+b y Cl a/b, fue la primera la que presentó diferencias significativas a favor de los cafetos expuestos a 85 % de exposición solar.

Por su parte, Alejandro (2014) reportó que independientemente de la época de evaluación, las plantas cultivadas en condiciones de baja disponibilidad hídrica presentaron reducciones en la fotosíntesis (A), conductancia estomática (gs) y en la razón Ci/Ca en los dos tratamientos lumínicos. Estos cambios fueron acompañados con la reducción en la conductancia hidráulica y la transpiración. No se presentaron diferencias significativas en la producción cuántica efectiva, en el coeficiente de extinción no-fotoquímica y en la productividad cuántica basal de los procesos no fotoquímicos y concluyen que cualquier recomendación de uso de sombrío como práctica de manejo debe ser tomada con precaución.

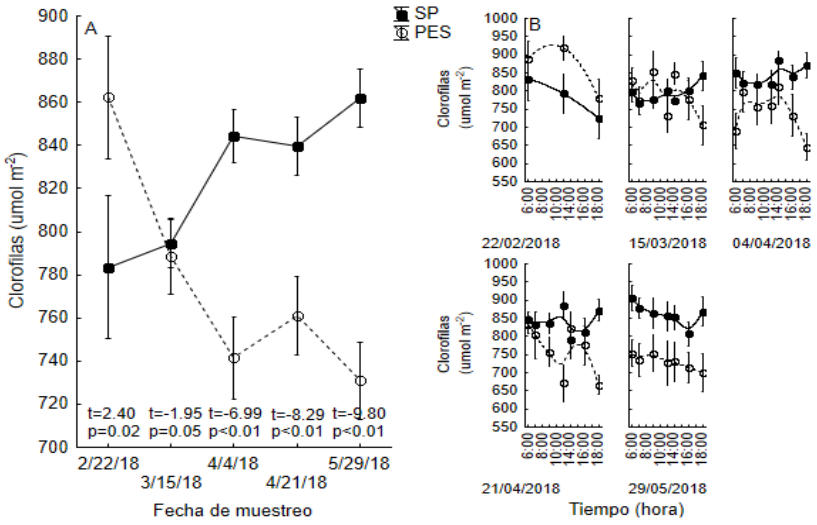

Figura 9. Variaciones estacionales (A) y diurnas (B) del contenido de clorofilas en plantas de cafetos expuestos a Plena Exposición Solar (PES) y Sombra Permanente (B).

En la literatura revisada no se encontraron reportes de variaciones diurnas del contenido de clorofilas, lo cual sería un aporte novedoso de nuestra investigación. Se demuestra con este estudio que la síntesis de clorofilas varía durante el día y que en plantas expuestas a PES se produce una fotooxidación de las moléculas de clorofilas en las horas del mediodía. El incremento observado en las plantas sombreadas a partir de las 16:00 h sugieren que el proceso foto-oxidativo es mucho menor a la sombra que a PES.

Nuestros resultados, en sentido general, indican que el cafeto bajo las condiciones micro-climáticas estudiadas muestran respuestas diferenciadas a la radiación solar que revelan posibles mecanismos de adaptación a altos niveles de radiación solar; sin embargo, la mayor pérdida de agua por transpiración a la sombra pudiera indicar mayor apertura estomática y como consecuencia mayor asimilación de CO_2. Estos resultados se respaldan por el mayor contenido de clorofilas observado a la sombra.

Se necesitan estudios adicionales en los que se pueda conocer con exactitud la fotosíntesis neta bajo estas mismas condiciones para llegar a resultados más consistentes y recomendaciones sobre la factibilidad del cultivo del cafeto a PES con un beneficio costo que implique mayor equilibrio entre la productividad biológica y agrícola del cultivo de cafeto en las condiciones de la región Frailesca.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La respuesta fisiológica del cafeto está probablemente supeditada a los cambios observados en el microclima que rodea las plantas expuestas a plena exposición solar (PES) y sombra permanente (SP). La densidad del flujo fotónico fotosintético fue mayor a PES, mientras que la temperatura diurna del aire y la humedad relativa fueron similares a PES y a SP; sin embargo, la temperatura del suelo fue significativamente mayor a PES que a SP.

Se observaron variaciones estacionales del contenido relativo de agua. En tres de los cinco muestreos realizados, se observó un mayor contenido de agua en las plantas de cafetos sombreadas y en sentido general se observaron disminuciones en el CRA en horas cercanas a las 12:00 horas.

La pérdida de agua por transpiración fue mayor en los cafetos sombreados, probablemente debido a una mayor apertura de los estomas, lo cual conduce a una mayor asimilación de CO_2 y mayor tasa de fotosíntesis neta, y se correspondió con el mayor contenido de clorofilas registrado en los cafetos sombreados.

Las variaciones diurnas de clorofilas demuestran que la síntesis de las moléculas de clorofilas varía durante el día y que en las plantas expuestas a PES se produce un proceso de foto-oxidación del cual las plantas no se recuperan en la tarde. Mientras que las plantas sombreadas mostraron una recuperación en la síntesis de las clorofilas posterior a las 16:00 horas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alarcón, A. 2011. Modelo de gestión productiva para el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en el sur de ecuador.
2. Amico AF, Lichtenberg GS, Reisner SA, Stone CK, Schwartz RG, Meltzer RS. Superiority of visual versus computerized echocardiographic estimation of radionuclide left ventricular ejection fraction. Am Heart J 1989; 118:1259–65.
3. Arcila, P. J.; L. Buhr; H. Bleiholder; H. Hack; H. Wicke (2001): "Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de las fases fenológicas del desarrollo de la planta de café (Coffea arabica L.)", Cenicafé, Boletín Técnico. P. 23, 32.
4. Argentel, L.; González, L.M.; Ávila, C.; Aguilera, R. 2006. Comportamiento del contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos fotosintéticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones de salinidad. Cultivos tropicales. Vol. 27. Núm. 3. Pág. 49-53.
5. ASERCA (2013). Cumbre Latinoamericana del Café. Agosto 2013. Consultado el 08 de Diciembre de 2014 en http://www. mexbest.com/es/eventos-y-misiones-comerciales/cumbre-latinoamericana-del-caf.html
6. Asociación bancaria de Guatemala. 2012. Recuperada el 08 de diciembre de 2014 de: http://www.abg.org.gt/pdfs/diciembre2012/SECTOR%201%20CAFE%20DICIEMBRE%202012.pdf

7. Barreiro Bravo, X. L. (01 de 11 de 2015). Plan de negocio para la creación de una empresa purificadora y envasadora de agua, cantón Quevedo, año 2014. Recuperado el 30 de 07 de 2017, de Quevedo: UTEQ. 92p. http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/405.

8. Barrera, J. F., J. Herrera & L. Cruz. 2004a. Factores que influyen sobre la captura de la broca del café *Hypothenemus hampei* con trampas. En: Resúmenes del I Congreso Internacional sobre Desarrollo de Zonas Cafetaleras. 6-8 de Octubre de 2004, Tapachula, Chiapas, México, p. 50.

9. Barros, R.S., Maestri, M. and Coons, M.P. (1978) 'The physiology of flowering in coffee: a review', *Journal of Coffee Research, 8*, 29–73.

10. Benetti, Q.V.R.; Falh, J.I y Carvalho, C.C. 1992. Varicao na anatomia foliar de cafeeiros submetidos a diferentes intensidades luminosas. Rev. *Bras*. *Fisiol. Veg*., vol. 4, No. 2. P. 99-105.

11. Black, C.C.; Osmond, B. 2003. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: "worwing the nigth shift". Photosynth. 76: 329-341.

12. Brealy, O. y Carvajal, J.F. 1971. La actividad de la reductasa del nitrato como guía de la fertilización nitrogenada del cafeto. Resúmenes IV simposio latinoamericano de fisiología vegetal. Lima, Perú.

13. Busk, P.K., Jensen, A.B., and Pages, M. (1997). Regulatory elements in vivo in the promoter of the abscisic acid responsive gene rab from maize. Plant J. 11, 1285-1295.

14. Cannel, M.R.G., 1975. Crop physiological aspccts of coffee bean yield. J. Coliee Research 5: 7-20.

15. Cardona, C.D.A.; Sadeghian, K.S. 2005. Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrío de *inga spp*. Cenicafe. 56 (2): P. 127-141.

16. Carvajal, J. 1984. Cafeto cultivo y fertilización. Instituto Internacional de la Potasa Berna, Sulza. p. 215-216.

17. Carvajal, J.F. 1984. Cafeto-cultivo y fertilización. Segunda edición. Instituto internacional de la potasa. Bern/Suiza. 254 Pág.

18. Carvajal, J.F. y López, C.A. 1965. Acumulación de nutrimentos en el suelo en función de la fertilización periódica. Universidad de Costa Rica. laboratorio de investigación agronómica. Informe anual. 1964. PAG. 13-16.

19. Caviglia, O. P. and V. O. Sadras (2001): “Effects of nitrogen on conductance, water and radiation use efficiency of wheat”. Fields Crop Research 64 (3): P.259-266.

20. Da Matta, F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. Field Crops Research 86: 99-114.

21. Duran, F. 2010. Cultivo del café. Grupo Latino Editores S.A.S, Colombia. Pág. 91-92.

22. Encalada, C.M.; Soto, C.F.; Morales, G.D.; Álvarez, B.I. 2016. Influencia de la luz en algunas características fisiológicas del cafeto (Coffea Arabica L. cv Caturra) en condiciones de vivero. Cultivos Tropicales. Vol. 37. No. 4. Pp. 89-97.

23. Fahl, J. I.; M. L. C. Carelli; J. Vega y A. C. Magalhaes (1994): “Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (Coffea arabica L.)”. J.Hort.Sci. 69: P. 161-169.

24. Felicito, A.L.E. 2016. Comportamiento fisiológico y desarrollo vegetativo en plantas de café (Coffea arabica L.) en condiciones de campo, con cuatro niveles de sombra en San Antonio de las Aradas del Canton Quilanga. Tesis. Pág. 05-46.

25. Flores, V.F. 2015. Ventana de oportunidades para el sector agrícola de Chiapas. Espacio I+D, innovación más desarrollo. Vol. IV, Núm. 7. P. 175-194.

26. Friend, D.J.C. 1984. Shade adaptation of photosynthesis in *coffea Arabica* L. Photosynthesis Research. Vol. 5. P. 325-334.

27. Guiltinan, M.J.; Marcotte, W.R.(Jr).; Quatrano, R.S. 1990. A plant leucine zipper protein that recognizes an abscisic acid response element. Science 250:267–71.

28. Hikosaka, K and I. Terashima (1995): “A model of the acclimation of Photosyntesis in leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use”. Plant, Cell and Environment. 18: 605-618.

29. ICAFE. 2011. Instituto del café de Costa Rica. Guía técnica para el cultivo del café. Costa Rica.

30. Jaramillo, R.M.V.; Cabrera, E.T.M. 2014. Evaluación de indicadores fisiológicos asociados a tres niveles de sombra en diferentes fases de desarrollo de plántulas de café, en dos condiciones edafo climáticas. Tesis. Loja Ecuador. Núm. P. 62 y 73.

31. Jaramillo-R., A. y Chávez-C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (Coffea arabica L.) al sol y bajo sombra. CENICAFÉ, 1999, vol. 50, No. 2. P. 97-105.

32. Kanechi, H.; Uchida, N.; Yasuda, T.; Yamaguchi, T. 1995. Non-water stress effects on leaf transpiration and photosynthesis of coffea arabica L., under different irradiance conditions. International scientific colloquium on coffea. Kioto, Japan 9- 14. Vol. 2. P. 520-527.

33. Kumar, D; Tieszen, L.L. 1980. Photosynthesis in Coffea arabica: effects of light and temperature. Experimental Agriculture 16(1): 13-19.

34. Lira Ricardo. 2010. Fisiología vegetal. Trillas. México. Pág. 38, 39, 40, 162-164, 171-173.

35. Luttge,U. 2004. Eco fisiología del metabolismo acido de las crasulaceas (CAM). Annals of Botany. 93. 629-652.

36. Malavolta, E. 1962. Fertilización del café en memoria del seminario de fertilización y nutrición del café. ANACAFE-USAID-PPIC. P. 26-42.

37. Manrrique, E. 2003. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de la luz. Ecosistemas. Vol. XII. Núm., 1. Pág. 1-11.

38. Mariel, N. M.; Noel, N. M.2010. Trabajo final de la carrera técnico superior en Gestión Gastronómica. Instituto superior. Núm. 4. “sol”. P. 2-74.

39. Marín, G.T.; Gómez, M.F.C.; Aguilar, R.N.; Murguía, G.J.; Trejo, T.L.I.; Pastelin, S.M.C.; Castañeda, C.O. 2018. Variaciones en el área foliar y concentraciones de clorofilas y nutrimentos esenciales en hojas de café robusta (*coffea canephora* P.) durante un ciclo anual. Agroproductividad. Vol. 11. Núm. 4. Pág. 36-41.

40. Morais. H.; Medri. M.E.; Marur. C.J.; Caramuri. P.H.; Arruda. R.A.M.; Gómez. J.C. (2004). Modifications on leaf anatomy of *Coffea Arabica* L, caused by shade of pigeon pea (*Cajanus cajan*). *Braz arch biol technol*, 47 (6), 863-871.

41. Morales, D.; Jeréz, E.; Dell´Amico, J.; Torres, W. and Álvarez, F. Comportamiento de algunos indicadores fisiológicos del estado hídrico de las plantas en diferentes condiciones de cultivo. Cultivos Tropicales, 1991, vol. 12, no. 3, p. 31-37.

42. Nilsen, E.T.; Y Orcutt, D.M. 1996. Physiology of plants under stress. Abiotic factors. John wiley and sons, New York, NY.

43. Nunes, M.A., 1988. Environmental effects of stomatal and mesophyll regulation of photosynthesis in coffee leaves. Photosynthetica 22, 547–553.

44. Pérez, P.E.; Bonilla, C.S.; Hernández, S. J. A. M.; Partida, S. J.2011. Estrategia de mejoramiento de la producción cafetalera de la organización de campesinos ecológicos de la Sierra Madre de Chiapas: caracterización de la bebida del café. Revista de la geografía agrícola. Núm. 46-47. P. 7-18.

45. Potters G, Pasternak TP, Guisez Y, Palme KJ, and Jansen MAK. Stress-induced morphogenic responses: Growing out of trouble? Trends Plant Sci 12: 98–105, 2007.

46. Ramalho, J. C.; Campus, P. S.; Quantin, V. L. and Nunes, M. A. Hight irradiance impairments on photosynthetic electron transport, ribulose-1,5 biphosphate carboxilase/ oxigenase and N assimilation as a function of N

availability in Coffea arabica L. plants. Journal of Plant Physiology, 1999, vol. 154, no. 3, p. 319-326.

47. Ramalho, J. C.; P. S. Campos; M. Texeira; M. A. Nunes (1998): “Nitrogen dependent changes in antioxidant system and fatty acid composition of chloroplast membranes from Coffea arabica L. Plants submitted to high irradiance”. Plant Science 135: P.115-124.

48. Ramalho, J.C., Pons, T.L., Groeneveld, H.W., Azinheira, H.G., Nunes, M.A., 2000. Photosynthetic acclimation of high light conditions in mature leaves of Coffea arabica L.: role of xanthophylls, quenching mechanisms and nitrogen nutrition. Aust. J. Plant Physiol. 27, 43–51.

49. Ramírez, B.V.H.; Moreno, B.A.M.; López, R.J.C. 2012. Evaluación temprana de la deficiencia del nitrógeno en café y plantaciones. Cenicafe. Pág. 01-08.

50. Reigosa, M.J., N. Pedrol y A. Sánchez. 2004. La ecofisiología vegetal. Una ciencia de síntesis. Paraninfo S. A., Madrid. 1193 p.

51. Rena, B. A; S. R. Barros; M. Maestri; M. R. Sondahl (1994): Coffee. en: Handbook of environmental phisiology of fruit crops. Volume II, Subtropical and tropical crops. CRC Press,. pp. 101-122.

52. Rhizopoulou S, Nunes MA (1981) Some adaptative photosynthetic characteristics of a sun plant (*Ceratonia siliqua*) and a shade plant (*Coffea arabica*). In: Margaris N, Mooney H (eds) Components of productivity of Mediterranean-climate regions. W. Junk, Den Haag, pp 85–89.

53. Rodríguez, L.: Valdés, R.; Verdecia, J.; Arias, L.; Medina, R.; Velasco, E.2001. Growth, relative water content, transpiration and photosynthetic

pigment content in coffee trees (C*offea arabica L*.) growing at different sunlight regimes. Cultivos tropicales, vol. 22, núm. (4):37-41.

54. Rodríguez, L.A.; Orozco, V.; Velazco, E.; Medina, R.; Verdecia, J.; Fonseca, I. 1999. Niveles óptimos de radiación solar y su relación con el crecimiento vegetativo, desarrollo foliar y la productividad del cafeto (*coffea arabica* L.). Cultivos tropicales. 20 (4). Pág. 45-49.

55. Rodríguez, L.L.; Velasco, E.; Segura, N.; Carrazana, J.; Medina, R.2004. Atenuación de la radiación solar global en un cafetal (*Coffea arabica L.*) bajo sombra. ITEA: 97-102.

56. Rodríguez, L.L.A.; Guevara, H.F.; Gómez, C.H.; Fonseca, F.M.; Gómez, C.J.C.; Pinto, R.R. 2015. Anatomía foliar relacionada en la ruta fotosintética en arboles de café (*Coffea arabica* L. Var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de exposición solar en la sierra maestra, Granma, Cuba. Acta Agron. P. 248-254.

57. Rodriguez, L.L; Valdes, R.; Medina, R.; Velasco, E.; Fonseca, I.; Verdecia, J.; Zamora, R.; Celeiro, R.F. 2005. Aplicaciones del enfoque multivariado para estudiar las respuestas fisiológicas del cafeto (*Coffea arabica* L. Var. Caturra rojo) a diferentes niveles de irradiación solar. Centro agrícola. Núm. 2. Pág. 23-30.

58. Romero, E., S.I. Mercado, H.A. Ibáñez y N.E. García-Calderón. Distribución especial del pH, humedad y resistencia mecánica en sitios con dosel abierto y cerrado en un agroecosistema cafetalero, Pluma Hidalgo, Oaxaca, México. En: Simposio Internacional de Café y Cacao

CUBACAFÉ99, Programa, Conferencias y Resúmenes. (1999 nov. 25-27 : Santiago de Cuba). p. 93.

59. SAGARPA. 2012. Dato básicos del cultivo del café. Impactos de café. Sagarpa: [Fecha de consulta 15 de noviembre de 2013]. Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documentos/Cultivos%20Agroindustrias/Impactos%20Caf%C3%A9.pdf.

60. Saugier, B. 1998. Environmental limitations of Plant Produclivity. En Proceedings of the European School o CUmatology and Narural Hazards Course. Yolterra, Ttalia, Mar:w 1996. European Cornmision.

61. Shao, H. B.; Chu, L. Y.; Jaleel, C. A.; y Zhao, C. X. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. Comptes Rendus Biologies 331(3):215 - 225.

62. Silva, H.O.; Fonseca, R.A. da.; Guedes filho, R. de S. 2000. Productive traits and digestibility of cassava leaf meal in broiler diets whit or without addition of enzymes. Rev. Bras. Zootec., 29 (3): P. 823-829.

63. Sotomayor; Duicela. 1993. Manual del cultivo del café. Eco fisiología del cultivo. Quevedo, Ecuador.

64. Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. Plant Physiology: Sinaver Associates, Inc. 700 p.

65. Tesha, A.J., Kumar, D., 1978. Effect of fertilizer nitrogen on drought resistance in Coffea arabica L. J. Agric. Sci. 90, 625–631.

66. Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 335-369. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

67. Velasco. E. Verdecia. J. Medina. R. & Rodríguez. L. (2001a). Variaciones en el microclima de un cafetal en dependencia de la exposición a la radiación solar en las condiciones del macizo de la sierra maestra. Cultivos Tropicales, 22(3), 53-59.

68. Yamasaki, S. and Rebello, D. L. Measurements of leaf relative water content. *Rev. Bras. Fis. Veg*. 1999, vol. 11, no. 2, p. 69-75.

69. Yamazaki, M., Ellis, A. W., Morrison, C. M., & Lambon Ralph, M. A. (1997). Two age of acquisition effects in the reading of Japanese Kanji. British Journal of Psychology, 88, 407-411.