

# COMPORTAMIENTO ECOFISIOLÓGICO DEL CAFETO (*Coffea arabica* L.) CV. CASTILLO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE TIBACUY, CUNDINAMARCA

## ECOPHYSIOLOGY PERFORMANCE OF COFFEE (*Coffea arabica* L.) CV. CASTILLO IN AGROFORESTRY SYSTEMS IN TIBACUY, CUNDINAMARCA

Piedad Cecilia Zapata Arango<sup>1</sup>, Hernán Jair Andrade Castañeda<sup>2</sup>, Zaira Katerine Nieto Abril<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agrozootecnista, M.Sc, en Agroforestería Tropical, Docente-Investigadora. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Calle 222 N. 55-37, Bogotá, Colombia, e-mail: pzapata@udca.edu.co; <sup>2</sup>Ingeniero Agrónomo, Ph.D., en Agroforestería, Docente- Investigador. Universidad del Tolima, Barrio Santa Helena Parte Alta, Código Postal N. 730006299, Ibagué, Colombia, e-mail: hjandrade@ut.edu.co; <sup>3</sup>Ingeniera Agrónoma, M.Sc., en Agroforestería Tropical. Consorcio Pomcas 2014, Carrera 48 # 93 -61, Bogotá, Colombia, e-mail: niabka@hotmail.com

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 20(1): 61-70, Enero- Junio, 2017

### RESUMEN

En Tibacuy, Cundinamarca, Colombia, se encuentran cultivos de café, tanto a pleno sol como con diferentes coberturas arbóreas y de plátano (*Musa AAB*); sin embargo, no se han realizado investigaciones que estudien las interacciones entre el dosel de sombra y el cultivo. Esta investigación, se centró en evaluar la respuesta ecofisiológica de plantas de café cv. Castillo en sistemas agroforestales (SAF), con tres niveles de sombra: baja, de 0 a 20%; media, 21 a 47% y alta, de 48 a 70%. Se seleccionaron cinco fincas por condición de sombra, con cafetales de 4 a 6 años. En cada predio, se estableció una parcela de 1.000m<sup>2</sup>, en la que se realizaron tres muestreos en el 2015: periodo lluvioso-enero, época de transición-junio y época seca-julio. En cada parcela, se seleccionaron tres plantas de café representativas y en cada planta tres hojas, una por estrato vertical: bajo, medio y alto. Se midió la radiación fotosintéticamente activa incidente (RAFAi), conductancia estomática, transpiración y asimilación neta de carbono, con un sistema de fotosíntesis portable CIRAS-3. Los resultados indican que niveles de sombra entre 48 y 70% afectaron negativamente la fotosíntesis de las plantas de café, mientras que con niveles de sombra, hasta de 47%, se obtiene una eficiencia fotosintética similar a plantas de café a pleno sol. Estos resultados son importantes para las decisiones de establecimiento y de manejo de sistemas productivos de café, principalmente, las relacionadas con el dosel de sombra.

Palabras clave: Asimilación neta de CO<sub>2</sub>, conductividad estomática, radiación fotosintéticamente activa, transpiración.

### SUMMARY

Coffee crops under full sun and different tree covers and plantain (*Musa AAB*) are located in Tibacuy, Cundinamarca, Colombia; however, no studies about interactions between canopy layer and the crop have been carried out. This research is focused in evaluating the ecophysiological performance of coffee bushes cv. Castillo in agroforestry systems (AFS) under three conditions of tree and plantain (*Musa AAB*) shade: low shade, 0-20%, medium shade, 21-47% and high shade, 48-70%. Five farms by type of shade with coffee plantations in production, aged between 4 and 6 years were selected. In each place, a sampling plot of 1000m<sup>2</sup> was established in which three recordings were taken in 2015: rainy season, January, transition period, June, and dry season, July. In each sampling plot, three representative coffee plants were selected, which were representative and in each plant, three leaves were selected: one by vertical strata: low, medium and high. The incident radiation photosynthetically active (PARI), stomatal conductance, transpiration and net assimilation of CO<sub>2</sub> were measured with a portable photosynthesis system CIRAS 3. The results show that high levels of shade between 48 and 70% negatively affected the photosynthesis rates of coffee plants; whereas with medium levels of shade up to 47% a similar photosynthetic efficiency than plants under full sun was obtained. These results are important inputs to consider in taking decisions for the establishment and management of coffee production systems regarding shade canopy.

Key words: Net assimilation of CO<sub>2</sub>, photosynthetically active radiation, stomatal conductance, transpiration.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, la zona cafetera se encuentra localizada en las laderas de las cordilleras que atraviesan el país de sur a norte; estos suelos son altamente variables en sus características, debido a su distribución en la zona cafetera, por su ubicación sobre distintos tipos de relieve, desde plano o ligeramente ondulado hasta abrupto, con valores de pendiente superiores al 75% (Arcila *et al.* 2007; Federación Nacional de Cafeteros, 2010).

Aunque el café es originario de ambientes sombreados, lo que le confiere capacidad de adaptación a estas condiciones, a menudo, crece mejor y produce mayores rendimientos sin sombra, pero a expensas de altas demandas de fertilización, particularmente de Nitrógeno y de su vida productiva (Da-Matta & Rodríguez, 2007; Franck & Vaast, 2009; Pompelli *et al.* 2010). Estudios demuestran que, con niveles de sombra superiores al 40%, la producción disminuye (Soto Pinto *et al.* 2000; Botero Jaramillo *et al.* 2010), pues se generan relaciones de competencia por agua, luz y nutrientes con el cultivo asociado y, como consecuencia la disminución de su rendimiento.

La producción está relacionada con la capacidad fotosintética de la planta, donde la Radiación Fotosintéticamente activa - RAFAi, se convierte en el principal factor limitante (Castilla *et al.* 2013); por esta razón, en estos sistemas de producción, el manejo de las interacciones biofísicas, principalmente transmisión de radiación y competencia por agua, determina, en gran medida, su éxito (Brenda, 2010; Charbonnier *et al.* 2013).

A su vez, la utilización de árboles de uso múltiple, que producen alimentos, forraje, madera y leña y su integración a los sistemas de producción agropecuarios, ofrecen soluciones sostenibles a varios problemas graves de gestión de la tierra, tal como la seguridad alimentaria, la protección del medio ambiente y mitigación del cambio climático, al capturar el CO<sub>2</sub> atmosférico, en biomasa y suelos (Nair, 2014; Farfán, 2014; Andrade *et al.* 2014).

Las especies vegetales, se encargan de transformar el CO<sub>2</sub> en carbono orgánico y almacenarlo como madera, materia orgánica, raíces y suelo, mediante el balance entre fotosíntesis y respiración (IPCC, 2013). Estos sistemas también permiten adaptarse al cambio climático, al regular el microclima y amortiguar los eventos climáticos extremos (Andrade *et al.* 2013). La presencia del dosel de sombra en sistemas agroforestales es capaz de reducir la demanda evaporativa general y la transpiración de café, por lo que ofrece un mayor nivel de protección de los cultivos frente a la vulnerabilidad agrícola a los recursos hídricos reducidos (Brenda, 2010).

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo, se centró en evaluar el efecto del nivel de sombrero sobre el comportamiento ecofisiológico de cafetos (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo, en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca, de manera que los resultados puedan ser insumos para la toma de decisiones, sobre el manejo de los sistemas productivos de café, en esta región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio y sistemas evaluados:** La investigación, se desarrolló en el municipio de Tibacuy, departamento de Cundinamarca, Colombia, ubicado en las coordenadas 4°21'04" N y 72°27'23" O. La cabecera municipal, se encuentra situada a una altitud de 1.647m, una temperatura media de 22°C y una precipitación media de 1.092mm/año. Los principales ingresos del municipio de Tibacuy son originados por actividades pecuarias y por el cultivo de café, que cubría 1.287ha con cv. Castillo, en el 2014, lo que representa el 87% del área en cultivos permanentes del municipio (Alcaldía de Tibacuy, 2016). El dosel de sombra en las fincas estudiadas estaba representado por árboles y plátano (*Musa* AAB). Las fincas seleccionadas, se ubicaron en la zona cafetera del municipio, en un rango altitudinal entre 1.442 y 1.712m. Las parcelas de muestreo tuvieron un rango de pendiente entre 30 a 60%, con suelos catalogados como fuertemente ácidos, pH entre 4,5 y 4,9, con una textura franca y niveles de materia orgánica, entre 5 y 11%.

Se hicieron recorridos por fincas cafeteras del municipio, a partir de los cuales, se seleccionaron cinco plantaciones de café por cada condición de sombrero: bajo, 0 – 20%; medio, 21 - 47% y alto, 48 – 70%. Todos los lotes seleccionados estaban plantados con cafetos cv. Castillo, con edades entre cuatro y seis años. Este cultivar y el cv. Colombia provienen de la misma estrategia de selección, del cruzamiento de Caturra x Híbrido de Timor, lo que les confiere similitud en muchos aspectos; el cv. Castillo posee resistencia a la roya del café y probable tolerancia a la enfermedad de las cerezas del café. El cv. Castillo, se caracteriza por que las hojas se disponen en el tallo casi verticalmente, dando una sensación de adormecimiento y la altura total promedio es de 2,3m. Durante la selección de esta variedad, se le dio prioridad al tamaño de grano (proporción de grano supremo > 80%) y a la productividad, con base en su comportamiento en regiones específicas de Colombia (Alvarado *et al.* 2005; Cortina Guerrero *et al.* 2012).

En todas las fincas seleccionadas, la fertilización era química inorgánica y el área de los lotes seleccionados estuvo entre 0,3 a 1ha, con una distancia de siembra entre plantas de café de 1,5 x 1,5m. En cada plantación, se estableció una parcela de muestreo rectangular de 1.000m<sup>2</sup> (20 x 50m), en donde se tomaron sistemáticamente cinco fotografías digi-

tales verticales a la copa de los árboles, con lente plano, a una altura de 1,50m sobre los cafetos, para estimar la sombra. Estas fotografías fueron procesadas con el software libre Gap Light Analyzer - GLA® (Frazer *et al.* 1999). A partir de estos resultados, se establecieron los rangos de sombrero evaluados.

Los sistemas de sombrero alto registraron una abundancia de 192 árboles/ha, representados en 14 especies, donde *Caliandra pittieri*, *Cordia alliodora*, *Citrus sinensis* e *Inga edulis* constituyen, en conjunto, el 82,3% de todos los individuos de esos sistemas. Los árboles tuvieron una altura total promedio de 13,6m y un diámetro a la altura del pecho-DAP, de 21,9cm. La abundancia de plátano fue en promedio de 110 individuos/ha.

En sistemas de sombra media, se registraron 144 árboles/ha y una mayor diversidad de especies, 24 en total, siendo las más abundantes *C. alliodora*, *Myrsine guianensis*, *Persea americana*, *Pittosporum undulatum*, *Aiouea dubia*, *Cedrela montana* y *C. sinensis* que, en conjunto, representan el 63% del total de individuos en el sistema. La altura promedio de los árboles fue de 11,6m y el DAP, de 18,9cm. La abundancia de plátano fue de 4 individuos/ha.

En cafetales con sombrero bajo, la densidad arbórea promedio fue de 40 individuos/ha, agrupados en 11 especies, donde las más abundantes fueron: *C. alliodora*, *Trichanthera gigantea*, *Myrsine coriacea*, *P. americana* que, en conjunto suman el 65% del total de individuos. La altura promedio de los árboles fue de: 11,6m y el DAP, de 20,3cm y se encontró una abundancia de 256 individuos/ha de plátano.

**Medición de las variables ecofisiológicas:** En cada parcela de muestreo, se seleccionaron tres plantas de café, que presentaban óptimas condiciones fisiológicas y fitosanitarias y que reflejaban la condición del sistema productivo. En cada planta monitoreada, se seleccionó una hoja sana por estrato bajo, medio y alto, del cuarto par, a partir del ápice de la rama. Se seleccionaron ramas con orientación al norte, buscando reducir la variabilidad espacial y temporal. La rama donde se inserta la hoja fue marcada con cinta de color, para hacer todas las mediciones en la misma hoja o en una hoja vecina, en caso de no encontrar la primera.

Se monitoreó la radiación incidente - RAFAi, la conductancia estomática - gs y la asimilación neta de CO<sub>2</sub> -A, con un sistema de fotosíntesis portable - CIRAS 3 PP SYSTEMS y una cubeta de hoja universal PCL-3, que incluye un analizador infrarrojo de gases CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. Se realizó una medición en cada época en las parcelas de muestreo, en tres horas del día: 09:00, 12:00 y 15:00h, con el fin de obtener un comportamiento diario de las variables de estudio. Antes de iniciar cada medición, se realizó un procedimiento de estabilización del equipo, el cual, se logra cuando el diferencial de CO<sub>2</sub> es

$0 \pm 0,5\text{mb}$ . Las mediciones, se realizaron en días despejados, condiciones necesarias para el óptimo desempeño del equipo; sin embargo, en algunos horarios, se presentó poca nubosidad, con muy baja densidad.

**Precipitación:** A partir de la información obtenida en la estación agroclimática de la estación de la granja Tibacuy, Código 2119503 (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia & CENICAFÉ, 2015), se clasificó cada uno de los muestreos, de acuerdo a su precipitación promedio: enero, se definió como la época lluviosa, mientras que junio fue de transición y julio, la época seca. La precipitación de las épocas de muestreo, se contrastó con los datos históricos, observando una menor precipitación en enero, época lluviosa, respecto al histórico: 96,9 vs 70,1mm/mes; mientras que para junio y julio de 2015, la cantidad de lluvia disminuyó frente al histórico: 33,6 vs 56,5 y 17,6 vs 41,3mm/mes, respectivamente.

**Métodos estadísticos:** Se empleó un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones y una estructura de parcelas divididas (bandas) en el tiempo, en donde las parcelas principales fueron los tres niveles de sombra y las bandas correspondieron a las tres épocas de muestreo. Se realizaron transformaciones logarítmicas para los datos de conductancia estomática, RAFAi y de raíz cuadrada para la asimilación neta, transpiración, con el fin de lograr la normalidad.

Se realizaron análisis de varianza y 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. Se estudió la relación entre las variables ecofisiológicas de los cafetos y el nivel de sombrero, mediante un análisis de correlación de Pearson. En el caso de encontrar correlación entre estas variables, se probaron modelos lineales, exponenciales y cuadráticos, que pudieran explicar la variable fisiológica, en función de la sombra. Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico InfoStat versión 2009 (Di Rienzo *et al.* 2009).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Radiación fotosintéticamente activa incidente (RAFAi):** Se detectaron diferencias significativas ( $p < 0,0001$ ) en la RAFAi entre los tres niveles de sombrero. Como era de esperarse, la mayor RAFAi se alcanzó en los cafetales con baja sombra, lo que superó en más de cuatro y casi dos veces lo alcanzado en cafetales de alta y media sombra. Siles & Vaast (2002) encontraron reducciones en la radiación entre 30 y 72%, en cafetales bajo *Eucalyptus deglupta* y *Terminalia ivorensis*, frente a aquellos a plena exposición solar, en Costa Rica. Estos resultados confirman que el sombrero limita la cantidad de RAFAi para el cultivo asociado, restricción que está relacionada con la densidad, edad y características estructurales de las especies arbóreas.

Se encontró una interacción estadística ( $p < 0,0001$ ) en la RAFAi entre el nivel de sombra y la época de muestreo, en donde el mayor valor de esta variable se alcanzó en la época seca en SAF con bajo sombrío y los valores inferiores en la misma, pero en alta sombra; en la época lluviosa, las tenden-

cias contrastaron con lo hallado en la seca: la mayor RAFAi se presentó en plantas de café con sombra media (Figura 1). Esto último podría obedecer a patrones localizados de nubosidad, que imponen una limitación a la radiación incidente disponible para el cultivo (Somarriba, 2004).

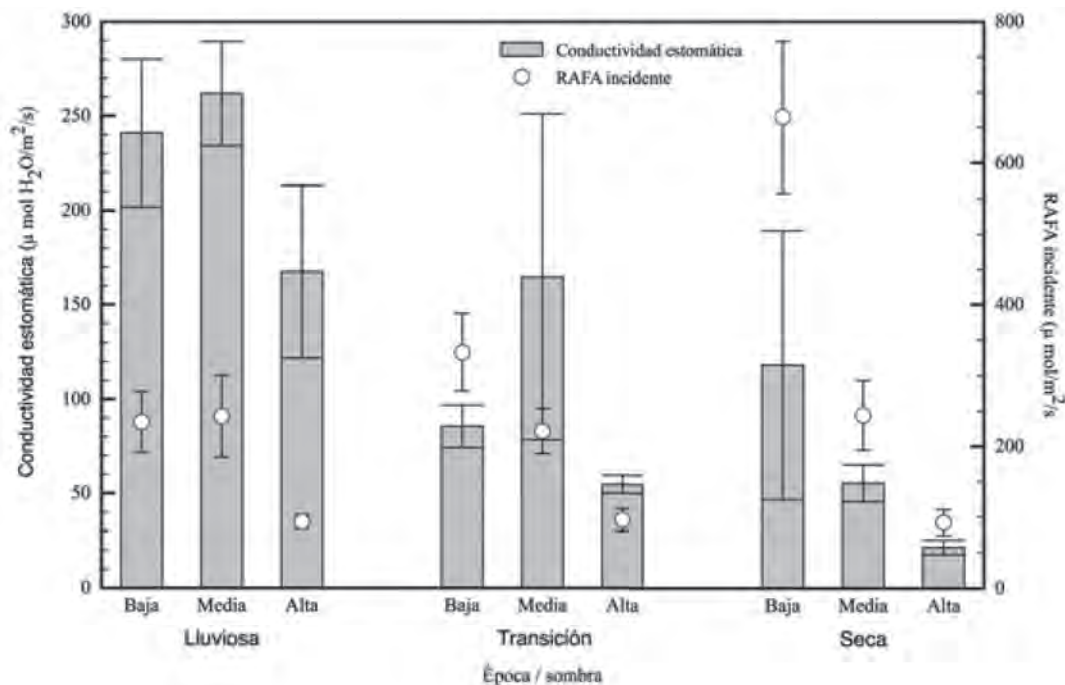


Figura 1. Radiación fotosintéticamente activa incidente (RAFAi) y conductividad estomática en cafetos en sistemas agroforestales, con tres niveles de sombra en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar de la media de los tratamientos.

Hubo una relación inversa entre la sombra del SAF y la RAFAi a los cafetos (Figura 2a). La tendencia de esta relación muestra que la RAFAi puede variar, en promedio, entre cerca de  $550 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  en los cafetales con bajo sombrío, hasta los  $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  en cafetales con niveles de sombra del 70%. Se encontró una ecuación exponencial negativa, la cual, indica una reducción rápida de la RAFAi con incrementos de la sombra (Figura 2a), que tiende a estabilizarse a altos niveles de sombra.

A excepción de cafetales con sombra baja en el periodo seco, los niveles de RAFAi, en este estudio son menores a  $600 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  que, de acuerdo con Araujo *et al.* (2008), no afectan significativamente la asimilación neta, ya que las hojas de los cafetos presentan una plasticidad morfológica o anatómica, más que fisiológica, para responder a cambios de radiación.

**Conductancia estomática:** Se detectaron diferencias significativas ( $p < 0,01$ ) en la conductancia estomática entre niveles de sombra, siendo mayor en los SAF con media y baja sombra, con respecto a los de sombra alta:  $160,6 \pm 36,1$ ;  $148,2 \pm 31,0$  y  $81,3 \pm 21,9 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente. En la época lluviosa, se registró una mayor conductancia estomática en sombra media y baja, que en alta, comparado con menores valores de actividad estomática en SAF con alta sombra, durante la época seca (Figura 1). Estos hallazgos resultan concordantes con lo reportado por Hay & Porter (2006), quienes mencionan que los estomas se cierran bajo la influencia de la sequía. A su vez, DaMatta *et al.* (2007) manifiestan que los valores de la conductancia estomática máxima se han promediado en  $108 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  para el café arábica, valores inferiores a los del presente estudio.

Se presentó una leve tendencia estadística ( $r = -0,3$ ;  $p = 0,27$ ) de reducción de la conductividad estomática, a medi-

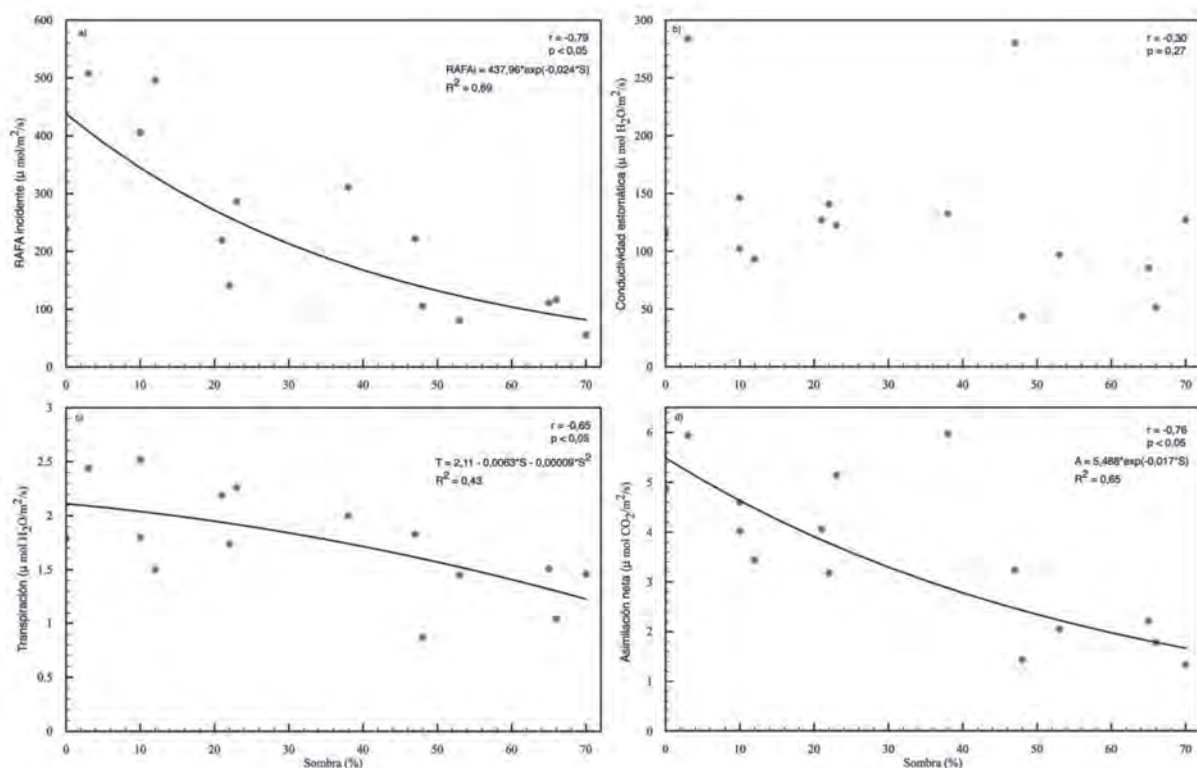


Figura 2. Relación entre nivel de sombra y a) radiación fotosintéticamente activa incidente (RAFAi); b) conductividad estomática; c) transpiración y d) asimilación neta en cafetos en sistemas agroforestales, con tres niveles de sombra en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. RAFAi: RAFA incidente ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ); S: sombra (%); T: transpiración ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ ); A: asimilación neta ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ ).

da que se incrementa la sombra (Figura 2b). Así, en la época seca, la RAFAi tuvo un impacto directamente proporcional en la conductividad estomática, mientras que en la transición y en la época lluviosa, la mayor actividad de los estomas, se alcanzó en sombras intermedias. Resultados similares al presente estudio fueron hallados por Martins *et al.* (2014), al estimar que un 10% de sombra causa una reducción del 36% en la conductividad estomática, respecto a plantas que crecían a pleno sol.

**Transpiración:** Los cafetos que crecían a sombra baja y media presentaron tasas de transpiración estadísticamente superiores ( $p < 0,05$ ), que aquellos en SAF con alta sombra:  $2,0 \pm 0,4$ ;  $2,0 \pm 0,4$  y  $1,3 \pm 0,3 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente. La transpiración presentó una interacción estadística ( $p = 0,0002$ ) entre el nivel de sombrero y la época, ya que en época seca y lluviosa este valor fue mayor en sombra media, mientras que en la época de transición la mayor pérdida de agua fue en baja sombra (Figura 3). Durante el periodo de lluvias, los cafetos transpiraron más, disminuyendo a medida que se reducía la precipitación; la mayor tasa de transpiración en cafetos durante la época lluviosa estaría relacionada con mayores tasas de conductancia estomática.

En todas las épocas, a mayor nivel de sombrero menor resultó la transpiración (Figura 3); esto coincide con Van Kanten & Vaast (2006), quienes afirman que los cafetos transpiran más por unidad de área foliar, cuando están a pleno sol que bajo sombra, lo cual, indica una situación de estrés de estas plantas, en condiciones no sombreadas.

Entre el nivel de sombra y la transpiración, se encontró una relación significativa e inversa  $r = -0,65$ ;  $p < 0,05$  (Figura 2c), lo cual, demuestra la importancia del manejo de la sombra en la economía hídrica y, posiblemente, en la eficiencia de uso de agua. La transpiración de cafetos en los SAF con alta sombra se redujo, en promedio, en un 36% respecto a los cafetales con baja y media sombra. La transpiración, se puede explicar mediante una ecuación cuadrática, empleando la sombra, como variable independiente (Figura 2c).

Los resultados de López (2004), con tasas de transpiración de  $1,3 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ , en cafetos de 12 meses de edad de cv. Colombia, a pleno sol y una altitud de 1.400m, contrastan con este estudio y podrían estar relacionados con factores, como la etapa fenológica de los cultivos, la edad y la consiguiente área foliar de las plantas (Van Kanten & Vaast, 2006) y los requerimientos ambientales propios de cada especie.

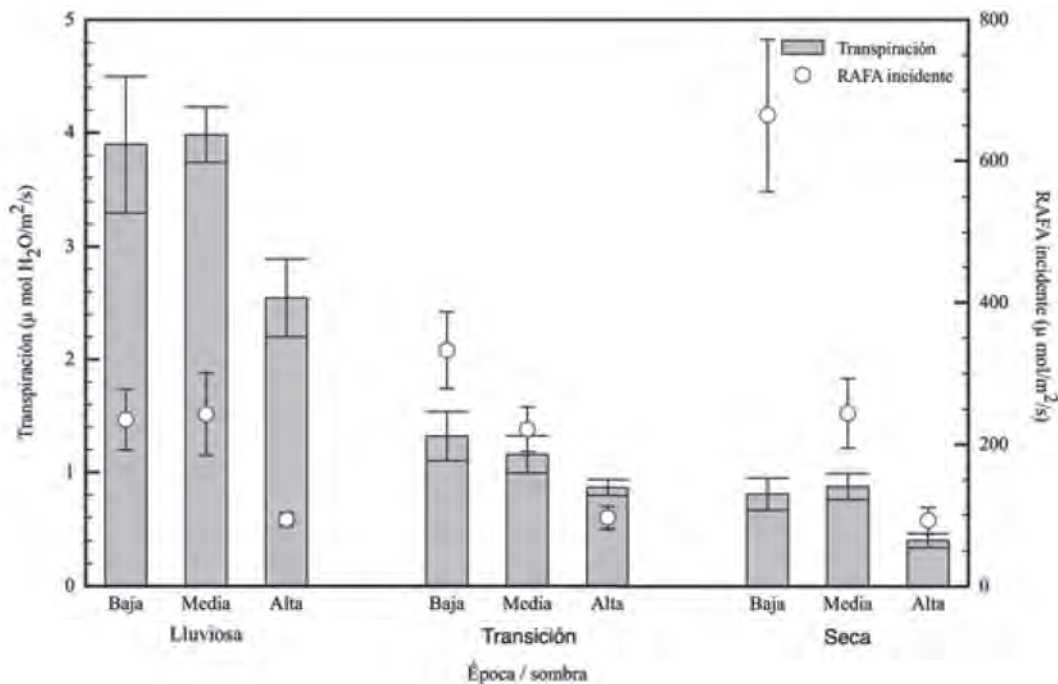


Figura 3. Transpiración en cafetos en sistemas agroforestales, con tres niveles de sombra arbórea en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar de la media de los tratamientos.

La reducción de la transpiración al incrementarse la sombra arbórea indica un ahorro de agua, principalmente importante para sitios con sequía estacional (Andrade *et al.* 2008). Esto se puede explicar por una menor tasa transpiratoria al reducirse la conductancia estomática. Mariño (2014), en sistemas de producción de café con sombra, concluyó que las reducciones de la conductividad hidráulica en el suelo y la transpiración de los cafetos indican una optimización del uso del agua; sin embargo, este fenómeno de ahorro hídrico usualmente trae consecuencias negativas a la asimilación de  $\text{CO}_2$ . En Chiapas, México, Brenda (2010), en sistemas con sombra igual o superior al 30%, se redujo la demanda transpiracional, en cerca de un 32%, respecto a un sitio con poca sombra.

**Asimilación neta de  $\text{CO}_2$ :** Se detectaron diferencias estadísticas ( $p < 0,0001$ ) en la asimilación neta entre los tres niveles de sombrero, siendo mayor en aquellos SAF que tenían baja y media sombra, con respecto a los de alto:  $4,6 \pm 0,7$ ;  $4,3 \pm 0,6$  y  $1,8 \pm 0,3 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente. Los cafetos presentaron una asimilación neta estadísticamente superior ( $p < 0,05$ ) durante la época lluviosa, que en la de transición y seca:  $5,8 \pm 0,7$ ;  $2,7 \pm 0,3$  y  $2,1 \pm 0,3 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente; sin embargo, se detectó una interacción significativa ( $p=0,0059$ ) entre el nivel de sombrero y la época (Figura 4). Los resultados de asimilación neta en SAF con baja y media sombra fueron concordantes con López (2004), quien para cafetos de cv. Colombia, de 12 meses de edad,

hallaron tasas de  $4,4 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , a una altura de 1.400m. Se detectó una relación significativa y negativa entre el nivel de sombra y la asimilación  $r = -0,76$ ;  $p < 0,05$  (Figura 2d). Martins *et al.* (2014) afirman que la asimilación neta en cafetos se reduce con incrementos de la sombra:  $7,9$  vs  $12,0 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , en plantas de 12 meses de edad, bajo 10% de sombra artificial y a plena luz, respectivamente. En contraste, Araujo *et al.* (2008) y Franck & Vaast (2009) afirman que el café es una especie adaptada a la sombra con hojas, que mantienen su desempeño fotosintético, en baja disponibilidad de luz. Tal como en el caso de la RAFAi, la asimilación decrece exponencialmente, con incrementos de la sombra (Figura 2d).

La mayor asimilación de  $\text{CO}_2$  en SAF, con bajos niveles de sombra, concuerda con los principios generales de la fisiología de las plantas (Taiz & Zeiger, 2006) y, en específico, de los cafetos (López, 2004), donde la fotosíntesis es determinada por la RAFAi, que es el principal factor limitante del proceso productivo. En cafetales en el Valle de Orosí, Costa Rica, Franck & Vaast, (2009) encontraron que la asimilación de  $\text{CO}_2$  se limitó fuertemente, al pasar de  $5,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$ , en sistemas con 100% de radiación, a  $2,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$ , en aquellos con 19% de RAFAi. Estos autores concluyen que estas diferencias fueron causadas, principalmente, por limitaciones en la conductancia estomática y que la sombra, de hasta 55%, es beneficiosa para la fotosíntesis del café, en esa región.

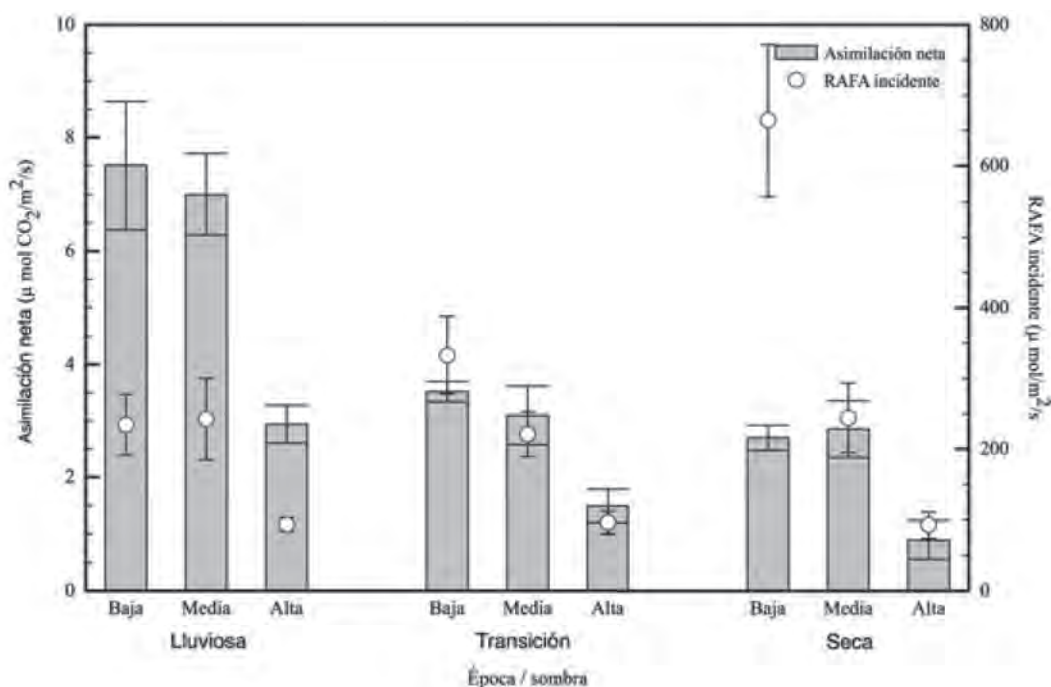


Figura 4. Asimilación neta de CO<sub>2</sub> en cafetos en sistemas agroforestales, con tres niveles de sombra arbórea en Tibacuy, Cundinamarca, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar de la media de los tratamientos.

Mosquera *et al.* (1999) afirman que la mejor actividad fotosintética de cafetos de cv. Colombia, Caturra e Híbrido de Timor, se encuentra a una temperatura de 25°C, la cual, está entre 5,4 – 11,7 μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/s. Estos resultados resultan superiores a los de este estudio, donde la máxima asimilación ocurrió en cafetales con bajos niveles de sombra, durante el periodo lluvioso: 7,5 ± 1,1 μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/s. Esta regulación climática puede estar dada por el sombrío de los árboles, ya que algunos autores, como Wilson & Wild (1991) y Siles *et al.* (2010) afirman que, bajo la copa, la temperatura ambiental se puede reducir hasta en 9°C. De acuerdo con López (2004), en plantas C3, como el café, un aumento en la temperatura superior a 28°C inhibe la actividad enzimática de rubisco, lo que repercutiría negativamente en la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>. Por esta razón, en zonas bajas de Colombia, donde se esperan incrementos de temperatura de 2°C para el 2100 (Ruíz Murcia *et al.* 2015), el sombrío de los árboles proporcionaría una regulación climática, para el cultivo asociado (Muschler, 1999; DaMatta & Rodríguez, 2007).

En este estudio hubo una relación estadística (p=0,06), entre la asimilación neta y la conductividad estomática, aunque ambas variables se redujeron al incrementarse la sombra en los SAF (Figura 2). En ese sentido, Morais *et al.* (2012) concluyen que la asimilación de CO<sub>2</sub> se ve limitada, principalmente, por los factores estomáticos y bioquímicos, mientras

que Rodríguez-López *et al.* (2013) hallaron una fuerte relación entre la asimilación y la conductancia estomática (r ≥ 0,85) en café robusta, en un sistema de cultivo en callejones, en Espírito Santo, Brasil.

La asimilación neta de CO<sub>2</sub> fue afectada por la disponibilidad de agua, disminuyendo 63% en la época seca frente a la lluviosa. Al respecto, Cavatte *et al.* (2012) manifiestan que, en condiciones de alta radiación, la sequía limita la tasa fotosintética de plantas de café, a través de limitaciones estomáticas. En Viçosa, Brasil, se detectó una disminución en la asimilación de 92%, en la época seca y de 76%, en época lluviosa, en *C. arabica*, cuando la disponibilidad de agua en el suelo se redujo a un 35% (Mariño, 2014). De la misma forma, se detectó una relación significativa entre la asimilación neta y la transpiración r = 0,84 y el nivel de sombra r = - 0,76; p < 0,05 (Figura 2d). Estas relaciones indican que la sombra de árboles en cafetales ayuda al ahorro de agua, al disminuir la transpiración, pero también reduce la fotosíntesis neta y, por ende, la acumulación de biomasa y producción.

En conclusión, la sombra en los cafetales estudiados disminuye la transpiración del café, pero cuando ésta es superior al 40%, se reduce la fotosíntesis neta y, por ende, se vería afectada la productividad del café, para las condiciones de

estudio, lo cual, concuerda con lo planteado por Soto Pinto *et al.* (2000). Con base en los resultados para Tibacuy, se recomiendan niveles de sombra, que no sobrepasen este valor.

**Agradecimientos:** Los autores manifiestan su agradecimiento a los 15 caficultores donde se realizó la investigación, por el acceso a sus fincas; a Diana Sánchez y Daniel Díaz, por su apoyo en la toma de datos; a la alcaldía y comité de cafeteros de Tibacuy, por el apoyo durante la ejecución del Convenio 009 de 2014, en el cual, se desarrolló la presente investigación. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Financiamiento:** Esta investigación fue financiada con recursos del departamento de Cundinamarca del Sistema General de Regalías - Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación, a través del Convenio 009 de 2014, suscrito entre el departamento de Cundinamarca y la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, donde participaron, como aliados, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Corporación Latinoamericana Misión Rural.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALCALDÍA DE TIBACUY. 2016. Plan de desarrollo municipal 2016-2019 "Porque Tibacuy Avanza". Disponible desde Internet en: [http://www.tibacuy-cundinamarca.gov.co/Nuestros\\_planes.shtml](http://www.tibacuy-cundinamarca.gov.co/Nuestros_planes.shtml) (con acceso el 11/08/2016).
2. ALVARADO, G.; POSADA SUÁREZ, H.E.; CORTINA GUERRERO, H.A. 2005. Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Avances Técnicos Cenicafé*. 337; 8p.
3. ANDRADE, H.J.; BROOK, R.; IBRAHIM, M. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*. (Netherlands). 308(1-2):11-22.
4. ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.A.; CANAL, D.S.; GÓMEZ, M.J.; MARÍN, M.P.; SIERRA, E.; ORTÍZ, I.G.; ALVARADO, J.J.; FERIA, M. 2013. Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal en el Departamento del Tolima. Sello Editorial Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia. 100p.
5. ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.A.; CANAL, D.S.; FERIA, M.; ALVARADO, J.J.; MARÍN, L.M.; PACHÓN, D.; GÓMEZ M.J. 2014. The carbon footprint of coffee productive chains in Tolima, Colombia. En: Oelberman, M. (Ed.). *Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation*. (The Netherlands). Wageningen Acad. Publishers p.53-66.
6. ARAUJO, W.L.; DIAS, P.C.; MORAES, G.A.B.K.; CELIN, E.F.; CUNHA, R.L.; BARROS, R.S.; DAMATTA, F.M. 2008. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. *Plant Physiol. Biochem*. 46(10): 884-890.
7. ARCILA, P.J.; FARFÁN, V.F.; MORENO, A.M.; SALAZAR, L.F.; HINCAPIÉ, E. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé, 2007. 309p.
8. BOTERO JARAMILLO, C.; SILVA SANTOS, R.H.; PRIETO MARTÍNEZ, H.E.; CECÓN, P.R.; PEREIRA FARDIN, M. 2010. La producción y el crecimiento vegetativo de los árboles de café bajo niveles de fertilización y sombra. *Scientia Agrícola*. (Brasil). 67(6):639-645.
9. BRENDA, B. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems, *Agricultural and Forest Meteorology* (Netherlands). 150(4):510-518.
10. CASTILLA, N.; BAEZA, E.J.; PAPADOPOULOS, A.P. 2013. *Greenhouse technology and management*. CABI Publishing. 2ª ed. 360p.
11. CAVATTE, P.C.; OLIVEIRA, A.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.; SANGLARD, L.; DAMATTA, F. 2012. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. *Physiologia Plantarum*. (United Kingdom). 144(111-122):111-122.
12. CHARBONNIER, F.; LE MAIRE, G.; DREYER, E.; CASANOVES, F.; CHRISTINA, M.; DAUZAT, J.; EITEL, J.; VAAST, P.; VIERLING, L.; ROUPSARD, O. 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 181:152-169.
13. CORTINA GUERRERO, H.; MONCADA BOTERO, M.P.; HERRERA PINILLA, J.C. 2012. Variedad Castillo: preguntas frecuentes. *Avances Técnicos Cenicafé*. 426; 12p.
14. DAMATTA, F.; RODRÍGUEZ, N. 2007. Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: Una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana*. 25(1):113-123.



15. DAMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol.* 19(4):485-510.
16. DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2009. Software estadístico-InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
17. FARFÁN, F. 2014. Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Manizales, Caldas. CENICAFÉ. 342p.
18. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. 2010. Nuestras Regiones cafeteras. Disponible desde Internet en: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la\\_tierra\\_del\\_cafe/regiones\\_cafeteras/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/) (con acceso 16/02/2017).
19. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA –FNC-; CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ – CENICAFÉ-. 2015. Registros de precipitación y brillo solar de la estación climática de la Granja Tibacuy para el periodo enero a julio de 2015. Disciplina de Agroclimatología, Archivos Climáticos, Chinchiná, Caldas, Colombia.
20. FRANCK, N.; VAAST, P. 2009. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Trees.* (Germany). 23(4):761-769.
21. FRAZER, G.W.; CANHAM, C.D.; LERTZMAN, K.P. 1999. Gap Light Analyzer (GLA) Version 2.0: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia- Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 36p.
22. HAY, R.; PORTER, J. 2006. The physiology of crop yield. 2ª ed. Iowa, USA: Blackwell Publishing LTDA. 314p.
23. IPCC. 2013. Climate change 2013: En: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.1535p.
24. LÓPEZ, J. 2004. Comportamiento del intercambio gaseoso de *Coffea arabica* L. en tres altitudes de la zona cafetera central colombiana. *Cenicafé.* (Colombia). 55(3):202-212.
25. MARIÑO, Y.A. 2014. Respuesta fotosintética de *Coffea arabica* L. a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica.* (Colombia). 63(2):128-135.
26. MARTINS, S.; GALMÉS, J.; CAVATTE, P.C.; PEREIRA, L.F.; VENTRELLA M.C.; DAMATTA, F.M. 2014. Understanding the low photosynthetic rates of sun and shade coffee leaves: bridging the gap on the relative roles of hydraulic, diffusive and biochemical constraints to photosynthesis. *Plos One.* (United States). 9(4):1-10.
27. MORAIS, L.E.; CAVATTE, P.; DETMANN, K.; SANGLARD, L.; RONCHI, C.; DAMATTA, F. 2012. Source strength increases with the increasing precociousness of fruit maturation in field-grown clones of conilon coffee (*Coffea canephora*) trees. *Trees.* 26(4):1397-1402.
28. MOSQUERA, L.; RIAÑO, N.; ARCILA, J.; PONCE, C. 1999. Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea* sp. *Cenicafé.* 50(3):215-221.
29. MUSCHLER, R. 1999. Árboles en cafetales. Módulo de enseñanza agroforestal N. 5. CATIE. (Costa Rica). 139p.
30. NAIR, P.K. 2014. Agroforestry: practices and systems, in encyclopedia of agriculture and food systems, Van Alfen, N. (ed.). Academic Press. (Inglaterra). p.270-282.
31. POMPELLI, M.F.; MARTINS, S.; ANTUNES, W.; CHAVES, A.; DAMATTA, F. 2010. Photosynthesis and photoprotection in coffee leaves is affected by nitrogen and light availabilities in winter conditions. *J. Plant Physiology.* (Germany).167(13):1052-1060.
32. RODRÍGUEZ-LÓPEZ, N.F.; CAVATTE, P.C.; SILVA, P.E.; MARTINS, S.C.; MORAIS, L.E.; MEDINA, E.F.; DAMATTA, F.M. 2013. Physiological and biochemical abilities of robusta coffee leaves for acclimation to cope with temporal changes in light availability. *Physiologia Plantarum.* 149(1):45-55.
33. RUIZ MURCIA, F.; GUTIÉRREZ VALDERRAMA, J.E.; DORADO DELGADO, J.; MENDOZA, J.E.; MARTÍNEZ ZULETA, C.; LASERNA, M.; HERNÁNDEZ GAONA, D.; RODRÍGUEZ SALGUERO, M. 2015. Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100: Herramientas científicas para la toma de decisiones – enfoque nacional – departamental: Tercera comunicación nacional de cambio climático. IDEAM- PNUI. Bogotá. 60p.

34. SILES, P.; HARMAND, J.M.; VAAST, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry systems*. (Netherlands). 78:269-286.
35. SILES, P.; VAAST, P. 2002. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y sin sombra. *Agroforestería en las Américas*. 9(35-36):44-49.
36. SOMARRIBA, E. 2004. ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? *Agroforestería en las Américas*. 41-42:120-128.
37. SOTO PINTO, L.; PERFECTO, I.; CASTILLO HERNANDEZ, J.; CABALLERO NIETO, J. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, México. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 80(1-2):61-69.
38. TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2006. *Plant Physiology*, Fourth Edition. Sinauer Associates. Sunderland, MA. 764p.
39. VAN KANTEN, R.; VAAST, P. 2006. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. *Agroforestry Systems* (Netherlands). 67(2):187-202.
40. WILSON, J.R.; WILD, D.W. 1991. Improvement of nitrogen nutrition and grass growth under shading. In: Shelton, H.M.; Stur, W.W. (Eds.) *Forages in plantations crops*. ACIAR Proc. no. 32:77-82.
- Recibido: Octubre 10 de 2016  
Aceptado: Marzo 26 de 2017

#### Cómo citar:

Zapata Arango, P.C.; Andrade Castañeda, H.J.; Nieto Abril, Z.K. 2017. Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) CV. Castillo en sistemas agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20(1): 61-70.