

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO GASEOSO PARA PLANTAS COMPLETAS<sup>1</sup>

Luis Fernando Gómez-Gil.\*; Néstor Miguel Riaño-Herrera\*

---

## RESUMEN

**GÓMEZ G., L.F.; RIAÑO H., N.M. Diseño, construcción y evaluación de un sistema de intercambio gaseoso para plantas completas. Cenicafé 52(3): 195-204. 2001**

Con el fin de medir el intercambio gaseoso [Fotosíntesis neta (*A*) y Transpiración (*E*)] en plantas completas, se diseñaron, construyeron y evaluaron dos cámaras en plexiglass transparente de 1,2m x 1,2m x 1,4m, las cuales cuentan con un acondicionador de aire convencional regulado por un sistema electrónico, que busca mantener las condiciones externas e internas lo más próximas posible, un sistema de riego y drenaje, una cámara para mezcla de gases y sensores de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa tanto al interior como al exterior. Las cámaras hacen parte del sistema de medición de intercambio gaseoso que además cuenta con: Sistemas de conducción de aire, analizadores infrarrojos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y un sistema de toma y almacenamiento de la información medida con todos los sensores y equipos, permitiendo su visualización en tiempo real. Las cámaras fueron probadas contra fuga de gases (entrada o salida) y luego del análisis de la información obtenida se concluyó que tanto las cámaras como todo el sistema completo son confiables para estudiar el intercambio gaseoso en plantas completas de especies de interés, principalmente de café *Coffea arabica* L.

**Palabras claves:** *Coffea arabica*, fotosíntesis, intercambio gaseoso, CO<sub>2</sub>, plantas completas.

---

## ABSTRACT

Two chambers made with transparent Plexiglas of 1.2m x 1.2m x 1.4m were designed, constructed and evaluated in order to measure gas exchange [Net Photosynthesis (*A*) and Transpiration (*E*)] in whole plants. These chambers count on conventional air conditioning regulated by an electronic system, which is meant to maintain external and internal conditions as close as possible. Likewise, each chamber includes irrigation and draining systems, a chamber to mix gases as well as temperature, relative humidity and photosynthetically active radiation sensors located inside and outside. These chambers are included in the gas exchange measurement system, which also has air pumping and conduction systems, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O infrared gas analyzers (IRGA) as well as an apprehension and storing method of the data assessed with all the sensors and equipment, hence, its visualization in real time is achieved. These chambers were tested with respect to gases escape using dry ice and water. The data analysis allowed concluding that the chambers and the whole system are reliable to study gas exchange in whole plants of several species, especially coffee plants *Coffea arabica* L.

**Keywords:** *Coffea arabica*, photosynthesis, gas exchange, CO<sub>2</sub>, whole plants.

---

<sup>1</sup> Fragmento de la Tesis "Estimación de la fotosíntesis en la planta completa de café *Coffea arabica* L. cv. Caturra" presentada por el primer autor a la Universidad de Caldas para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Manizales, Caldas, Colombia.

\* Asistente de Investigación e Investigador Científico II, respectivamente. Fisiología Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

El crecimiento vegetal y la productividad primaria de los ecosistemas dependen de la fotosíntesis, por ello, se hace necesario conocer el efecto de los factores exógenos sobre el comportamiento de este proceso en individuos completos para poder entender el funcionamiento de las poblaciones y su respuesta productiva.

La asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas completas ha sido estimada a partir de la medición de la fotosíntesis en hojas individuales, teniendo las precauciones de incluir datos sobre el comportamiento de hojas al sol y a la sombra y su balance de energía con el fin de no subestimar o sobrestimar la asimilación y la transpiración de la planta (3). También se han desarrollado sistemas que permiten confinar plantas anuales y perennes con el objeto de medir la fotosíntesis y el balance de carbono (8), para luego compararlos con los datos estimados a partir de la medición en hojas individuales. Entre los sistemas desarrollados se encuentra el SPAR (Soil – Plant – Atmosphere Research System) (14). En la actualidad sistemas como el FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment) (15), permiten hacer investigación sobre la fotosíntesis en comunidades de plantas cultivadas, tanto de uso agrícola como forestal, para tratar de entender el efecto del incremento de los gases de efecto invernadero y tal vez, los sistemas de mayor desarrollo son los denominados sensores remotos de la fotosíntesis terrestre, que utilizan todas las variables físico-químicas relacionadas con la interceptación de la radiación por el follaje, tanto en individuos como en poblaciones vegetales (5).

El principal factor que debe ser considerado al medir la fotosíntesis en una planta completa bajo condiciones semicontroladas, es garantizar que ésta se encuentre morfológica y fisiológicamente en un ambiente adecuado de crecimiento y desarrollo (1, 9).

Los métodos convencionales para determinar la asimilación de CO<sub>2</sub> y el crecimiento de las plantas miden el cambio del área foliar y de la

materia seca mediante muestreo destructivo; aunque esta técnica es adecuada para evaluar cambios a largo plazo no lo es cuando el interés se concentra en conocer la asimilación de CO<sub>2</sub> y el incremento de la materia seca a corto plazo, como en intervalos de días, horas o minutos (12).

Una de las ventajas de la medición de la absorción de CO<sub>2</sub> la constituye el hecho de ser un método alternativo y directo para medir la productividad, es instantáneo, no destructivo, permite hacer investigaciones separadas de hojas individuales y hace posible la separación de la ganancia fotosintética de las pérdidas por respiración. Entre las desventajas se puede mencionar que inevitablemente al material confinado se le altera su ambiente natural (12). Por tanto, en el criterio para diseñar cámaras de medición de intercambio de gases, imperan las condiciones de temperatura y humedad alrededor de las hojas o plantas, controladas por el operador e independientes de los flujos de calor y vapor de agua sobre la superficie de las hojas (10).

Los estudios de intercambio de gases se llevan a cabo en sistemas cerrados o abiertos. En el primer caso la hoja generalmente se introduce en una cámara transparente y el aire confinado recircula pasando a través de ella y del analizador infrarrojo; la disminución en la concentración de CO<sub>2</sub> o el aumento en el vapor de agua en un tiempo determinado permite calcular la tasa de intercambio de dichos gases. La limitación más importante de este sistema es el cambio rápido de las condiciones al interior de la cámara (temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, vapor de agua, etc.), que afectan el comportamiento de la hoja en tiempos cortos de medición. En el sistema abierto, la hoja, la planta completa o la población de ellas, permanecen confinadas en una cámara transparente, la cual se alimenta con aire ambiental permanentemente; antes de entrar a la cámara se mide la concentración de CO<sub>2</sub> o vapor de agua (referen-

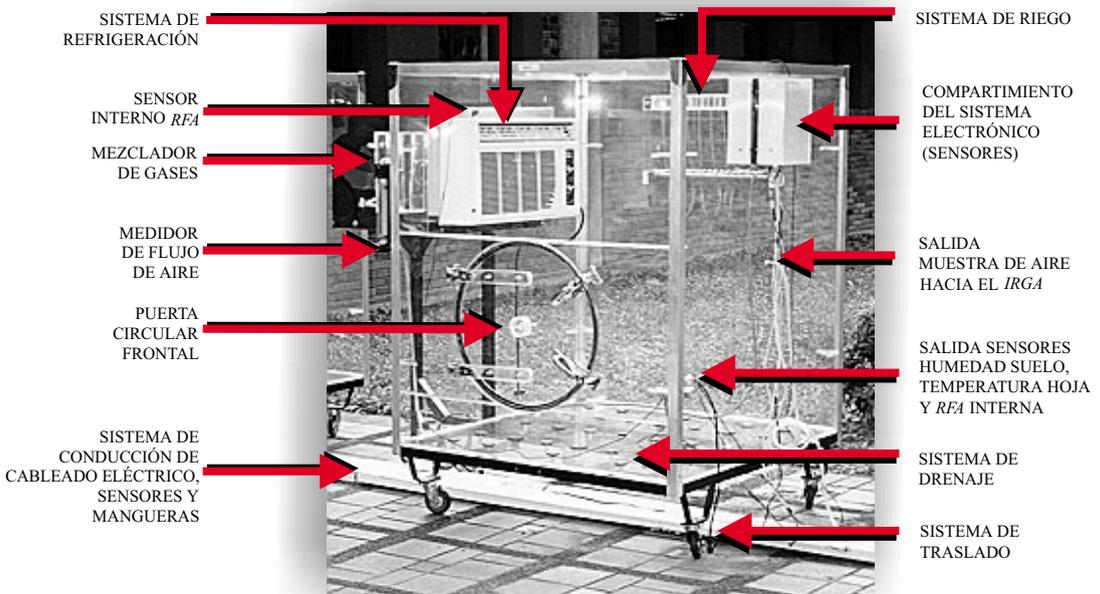
cia), y una vez pasa por la cámara se mide de nuevo y se libera al ambiente. La diferencia de concentraciones entre el aire de referencia y el que ha pasado por la cámara en un tiempo determinado, permite calcular la tasa de intercambio gaseoso. La ventaja de este sistema es que se mantienen más estables las condiciones al interior de la cámara, permitiendo obtener medidas en tiempos largos.

El uso de sistemas computarizados de adquisición de datos permite un control y monitoreo simultáneo, en tiempo real, de las variables ambientales y de intercambio gaseoso (1, 13, 14).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Características del sistema.** Se diseñaron y construyeron dos cámaras de plexiglas transpa-

rente, de 1,2m x 1,2m x 1,4m (largo x ancho x altura, respectivamente), para un volumen de 2,01m<sup>3</sup> (Figura 1), dotadas con puerta circular frontal (diámetro = 60cm), con un sistema de riego que permite adicionar por gravedad la cantidad de agua necesaria de acuerdo con los requerimientos de la planta, sistema de drenaje, recámara para la mezcla de gases, de tal forma que se pueda enriquecer el aire ambiental con gases de interés como CO<sub>2</sub>, sensores capacitivos de óxido de silicio (Panametics HC 625) para la medición de la humedad relativa (*HR*), sensores de resistencia de platino (100 Ohm para 0°C) para la medición de la temperatura del aire (*T<sub>a</sub>*) y sensores Quantum LI-190SA (LICOR Lincoln NE, Inc.) conectados al registrador de datos (datalogger LI-1000), para la medición de la radiación fotosintéticamente activa (*RFA*), tanto al interior como al exterior de las mismas. Además, termopares tipo T P-08505-90 (Cole-Parmer) que permiten medir la temperatura



**Figura 1.** Cámara para medición de intercambio gaseoso en plantas mantenidas en condiciones semicontroladas. (*IRGA*: Analizador infrarrojo de gases; *RFA*: Radiación fotosintéticamente activa).

foliar ( $T_f$ ) y un sensor Buriable Wave Guides 6005 conectado al equipo Time Domain Reflectometry – TDR (Soilmoisture equipment Corp.), que permite obtener la humedad volumétrica del suelo ( $H_s - 0$  a 20cm de profundidad). Las condiciones internas de temperatura ( $T_i$ ) y humedad relativa ( $HR_i$ ) son asistidas con un acondicionador de aire (Toshiba) de 14.000 btu de capacidad de refrigeración, al cual le fue instalado un sistema electrónico controlador que permite mantener las condiciones internas ( $T_i$ ,  $HR_i$ ) y externas ( $T_e$ ,  $HR_e$ ) lo más próximas posible.

Las cámaras permanecen a plena exposición solar, garantizando con ello la oferta natural de radiación para las condiciones de Cenicafé.

**Prueba contra fugas.** Uno de los principales requisitos que debe cumplir un sistema de intercambio gaseoso es que sea en lo posible, perfectamente hermético. Con el fin de detectar fugas de gases a su ingreso a las cámaras, se instalaron bandejas en su interior que contenían 2kg de hielo seco. Las cámaras se cerraron herméticamente y a través del sistema de riego se adicionó agua a cada bandeja; su reacción con el hielo seco produjo una nube de vapor blan-

quecino, generando una presión mayor dentro de las cámaras que fuera de ellas, lo cual permitió visualizar las fugas presentes para así proceder a su corrección (Figura 2). La hermeticidad de las cámaras es importante mas no es crítica, ya que en un sistema abierto de intercambio gaseoso, como en este caso, es mayor la presión adentro que afuera y el aire es más fácil que escape a que entre en el sistema, produciendo así un mínimo efecto sobre las lecturas (1, 7).

**Modo de operación del sistema.** Un compresor (Power Tools) de 1,5HP libre de aceite, succiona aire de la atmósfera a través de tubería de PVC cuya entrada se encuentra a una altura de 10m. El aire se almacena en un tanque de 48L de capacidad y luego se envía a través de mangueras (Masterflex Tygon lab. tubing) a las cámaras y al sistema de medición (aire de referencia), a una presión de 10psi y un flujo de  $10Lm^{-1}$ . Una muestra de aire de cada cámara es succionada y transportada por mangueras localizadas en el interior de canaletas de conducción (para evitar cambios en las propiedades físicas del aire) hasta los equipos de medición.

El sistema de medición consta de un selector de canales ADC-GHU (Analytical development Co. Hoddesdon-Hertz, UK), que se programa



Figura 2. Prueba para la detección de fugas de aire en las cámaras de intercambio gaseoso.

para que en tiempos predeterminados succione una muestra del aire de referencia o del aire procedente de cada una de las cámaras, que luego se envía con un flujo de  $200\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  a los analizadores infrarrojos de gases (IRGA) de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  ADC-225 MK3 (Analytical development Co. Hoddesdon-Hertz, UK), que miden la concentración de cada uno de los gases en ppm y mb respectivamente.

La señal electrónica de medición de cada analizador y de los sensores de  $HR$ ,  $T$  y  $T_f$  se envía instantáneamente a un sistema de toma de datos (Hydra Logger Fluke), mediante el programa Data Acquisition Software, que permite visualizar en un monitor la información adquirida en tiempo real, y en tiempos predetermina-

dos los transfiere mediante el programa Trend Link for Fluke a través de un puerto serial RS-232 a un PC (Figura 3), donde se almacena en la hoja de cálculo MS - Excel, para luego ser analizada utilizando los paquetes estadísticos SAS (SAS Institute) y Sigma Plot (SPSS Inc.). La información de  $RFA$  se colecta en el registrador de datos (datalogger LI-1000) y luego se transfiere al PC.

Para evaluar el comportamiento del sistema diseñado se analizó la información obtenida de las variables internas y externas de temperatura del aire ( $T_i$  °C;  $T_e$  °C), humedad relativa ( $HR_i$  %;  $HR_e$  %), radiación fotosintéticamente activa [ $RFA$ ,  $\mu\text{mol}_{(\text{fotones})}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ], concentración de  $\text{CO}_2$  y vapor de agua del ambiente (referencia), para

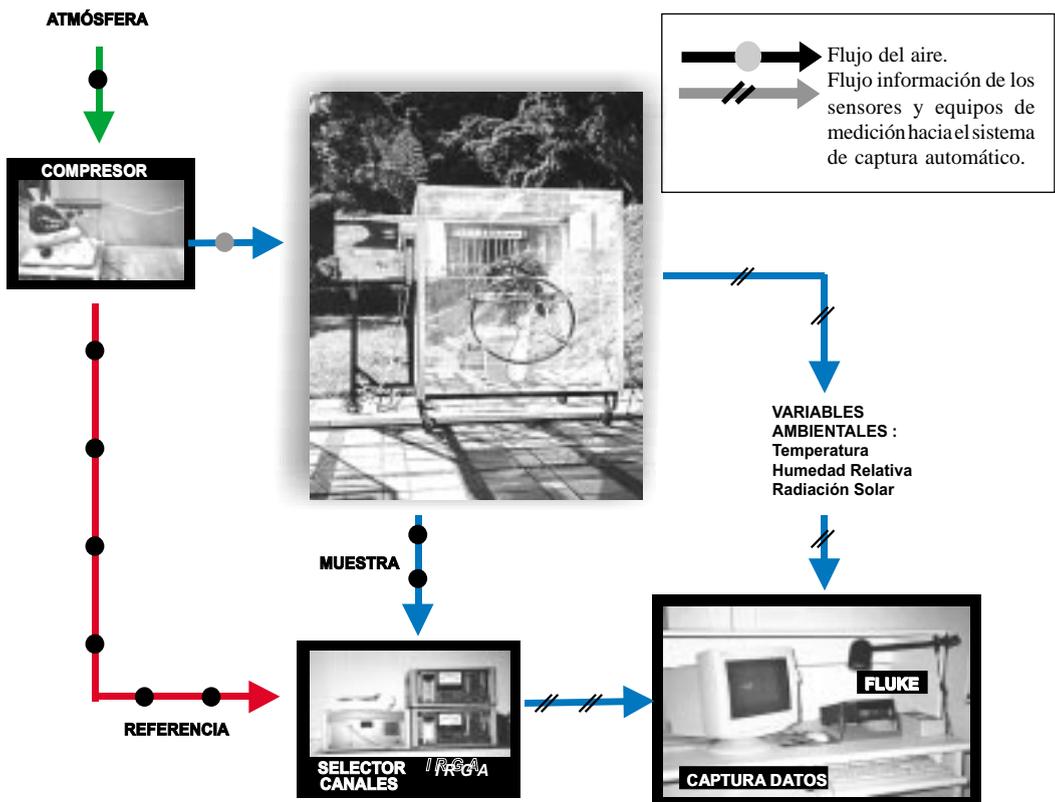


Figura 3. Esquema de operación del sistema para la determinación de la fotosíntesis en plantas mantenidas en cámaras bajo condiciones semicontroladas.

el período comprendido entre el 15 y el 22 de septiembre de 1999. En el interior de cada cámara, se colocó una planta de *Coffea arabica* L. cv. Caturra de 14 meses de edad, sembrada en un matero plástico de 30cm de diámetro por 35cm de altura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

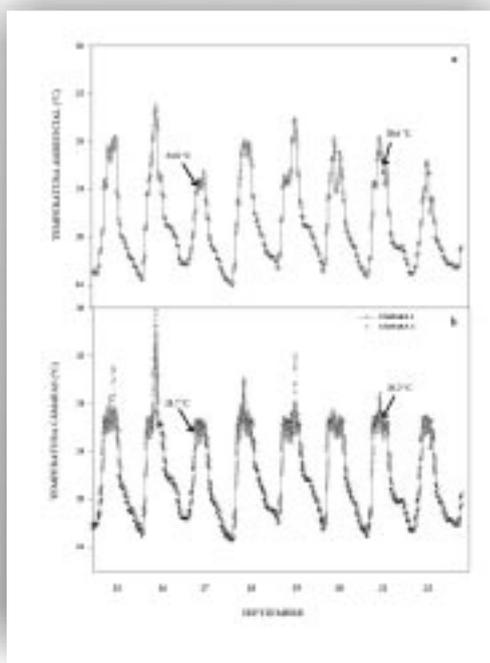
**Comportamiento de la temperatura del aire (Externa  $T_e$  - Interna  $T_i$ ).** El curso diario (diurno y nocturno) de la temperatura del aire, externa ( $T_e$ ) y al interior de las cámaras ( $T_i$ ) durante el período de medición, se presenta en la Figura 4a y 4b.  $T_i$  para todas las mediciones realizadas, independiente de la cámara utilizada tiene el mismo comportamiento; sin embargo, el análisis estadístico mediante la prueba de Student ( $T - 0,05$ ) indica que  $T_i$  es superior a  $T_e$ , independiente de la hora y día de medición. La comparación estadística de los valores para la misma hora y día entre cámaras no presentó diferencias.

Los valores que acompañan las flechas en la Figura 4 muestran para los días 17 y 21 de septiembre a las 11 y 14 horas, que  $T_i$  es superior a  $T_e$  en  $1,2^\circ\text{C}$ , aproximadamente. Este comportamiento es similar al mostrado por 7 y 14 para un sistema de medición de plantas completas en manzano (*Malus domestica* Borkh) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.), donde  $T_i$  fue superior a  $T_e$  entre 1 y  $2,5^\circ\text{C}$ , bajo las condiciones de la zona templada, donde el ángulo de incidencia de la radiación es menor que en el trópico.

El mayor calentamiento del aire al interior se debe al efecto invernadero que se genera por las reflexiones sucesivas de radiación al interior de las cámaras y por la disipación de la energía en radiaciones de longitud de onda del infrarrojo que son absorbidas por el  $\text{CO}_2$  y el vapor de agua, lo que se traduce en incrementos

de temperatura. A pesar de las diferencias encontradas,  $T_i$  se encuentra dentro de los rangos permisibles de  $T$  para el crecimiento y desarrollo adecuado de plantas adaptadas a condiciones tropicales (6, 16, 17).

**Comportamiento de la Humedad Relativa (Externa  $HR_e$  - Interna  $HR_i$ ).** Una de las variables más difíciles de manejar en condiciones de confinamiento es el vapor de agua. Si bien, éste se comporta como un gas ideal, donde los flujos de energía dependen de la temperatura, presión y volumen, al mantener las dos últimas constantes, la ocurrencia de cambios de temperatura más abajo del punto de saturación entre el exterior e interior de una superficie generan condensación o formación de rocío, afectando la presión de saturación de vapor y por tanto, el déficit de presión de vapor ( $DPV$ ), que es la diferencia entre la presión de vapor a saturación



**Figura 4.** (a) Temperatura ambiental ( $T_e$ ) y (b) Temperatura cámaras ( $T_i$ ) entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.

y la presión real de vapor a la misma temperatura. Si ello ocurre se tendrá una respuesta inmediata en la apertura de los estomas y en su intercambio gaseoso (12). Al relacionar la presión de vapor real y la presión de vapor a saturación se genera un valor denominado humedad relativa ( $HR$ ).

El análisis de los datos obtenidos indica que hubo diferencias significativas al 0,05 para la  $HR_i$  entre cámaras, y entre  $HR_e$  y  $HR_i$ . La humedad relativa al interior de las cámaras fue superior a la ambiental durante el día, en un promedio de 12,7% y en la noche entre 5 y 10% (Figura 5a). A pesar de los valores superiores al interior de las cámaras (Figura 5b), se aprecia que las oscilaciones diurna y nocturna fueron muy próximas en las dos condiciones.

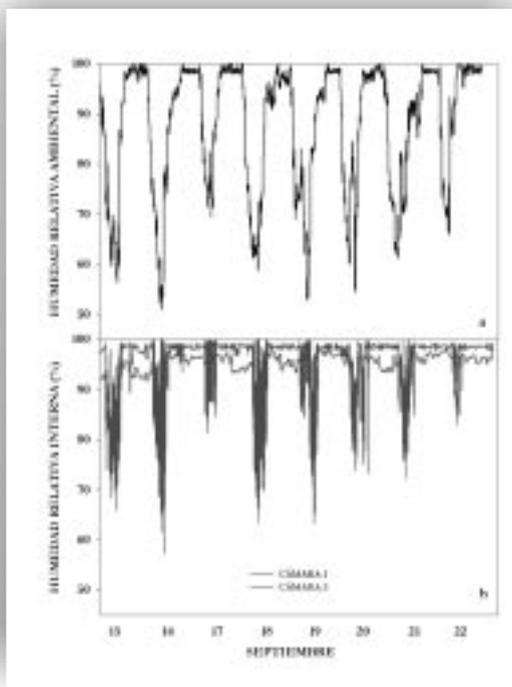
El incremento de  $HR_i$  (Figura 5b) se debe principalmente al flujo de vapor de agua procedente de la transpiración de la planta, que se genera en el complejo suelo – planta – atmósfera. Esta situación al interior de las cámaras debería favorecer el proceso de intercambio gaseoso debido a una disminución en el  $DPV$  entre la cámara subestomática y el aire circundante, permitiendo mantener los estomas abiertos por períodos más prolongados, tal como lo presentan Fanjul *et al.* (4). Debido a que  $T_i$  es mayor y  $DPV$  es menor al interior de la cámara, se genera un balance neto de masa y energía similar en condiciones internas y externas, lo que permite mantener las oscilaciones diarias de  $HR$  presentadas en las figuras 5a y 5b.

**Comportamiento de la Radiación Fotosintéticamente Activa ( $RFA$ ).** La variable medioambiental más difícil de suplir en condiciones controladas es la  $RFA$  tanto por su calidad como por su cantidad, lo cual está directamente relacionado con la actividad fotosintética. Por ello, las cámaras permanecen externamente bajo la oferta de radiación natural en la zona donde se encuentra localizada la sede principal de Cenicafé. El coeficiente de

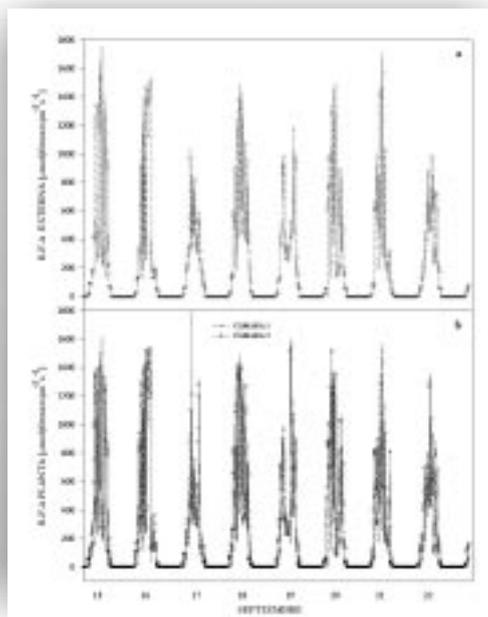
absorción ( $K$ ) del plexiglas, material de construcción de las cámaras, es del 8% (11, 12). En Cenicafé se obtuvo un  $K$  de 8,3%.

El comportamiento diario de  $RFA$  se presenta en la Figura 6, donde se observan diferencias en las mediciones instantáneas externas (a) e internas (b), que se debieron principalmente a la velocidad de los cambios en nubosidad, en períodos muy cortos, puesto que los valores obtenidos de cada sensor (interno y externo) no se realizaron en forma simultánea sino de forma secuencial con diferencias de 2 minutos.

Los valores máximos de  $RFA$  se midieron generalmente al medio día, en un rango de 1.700 a 1800  $\mu\text{mol}_{(\text{fotones})} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , valores típicos de  $RFA$  para días completamente soleados en las condiciones del trópico.



**Figura 5.** (a) Humedad relativa ambiental ( $H_e$ ) y (b) Humedad relativa interna de la cámara ( $H_i$ ) entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.



**Figura 6.** (a) Radiación fotosintéticamente activa externa y (b) que llega a las plantas entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.

### Comportamiento del $CO_2$ ambiental o de referencia [ $CO_{2ref}$ - $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$ ].

La concentración de  $CO_2$  en el aire medioambiental o de referencia ( $CO_{2ref}$ ) presentó valores máximos, promedio de  $430 \pm 8 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$  entre las 04:00 y 05:00 horas, en tanto que los mínimos, promedio de  $369 \pm 4 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$  se midieron alrededor de las 15:00 horas. En mediciones realizadas por Cadavid (2), para las condiciones de Cenicafé, se muestra que la concentración de  $CO_2$  ambiental, promedio en el día y la noche es de 368 y  $394 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})$ . La oscilación día - noche de la concentración de  $CO_2$  en el aire es estable a través del tiempo, y dependió fundamentalmente de la temperatura y del balance entre la fotosíntesis y la respiración de la vegetación circundante.

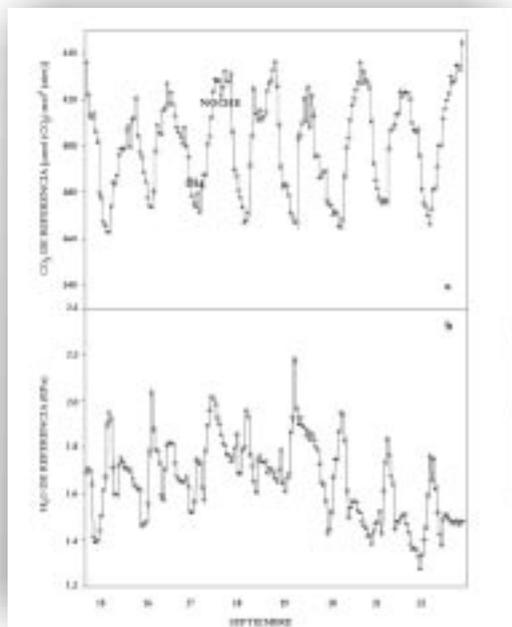
### Comportamiento de la concentración de vapor de agua en el ambiente o de referencia ( $H_2O_{ref}$ - kPa). El comportamiento de $H_2O_{ref}$ se

presenta en la Figura 7b. Los valores mínimos se midieron durante la noche (1,3kPa) y los máximos durante el día (2,2kPa). Se observa gran oscilación de los valores entre las horas y días de medición, similar a lo descrito por Bugbee(1), debido a que este factor depende de la temperatura, la precipitación, la velocidad del viento y la evapotranspiración.

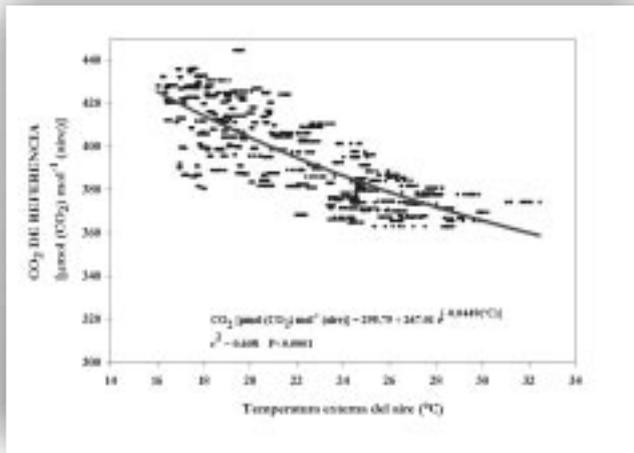
**Relación entre  $CO_{2ref}$  y  $T_e$ .** Con los datos obtenidos para  $CO_{2ref}$  y  $T_e$  se logró obtener un modelo exponencial que relaciona estas dos variables (Figura 8) y es de la forma:

$$CO_{2ref} [\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{mol}^{-1}(\text{aire})] = 295,75 + 267,01 e^{-0,0449(T_e \text{ } ^\circ\text{C})} \quad (r^2 = 0,608; P < 0,0001)$$

Este modelo describe cómo en la medida que la temperatura ambiental aumenta, la con-



**Figura 7.** (a) Comportamiento del  $CO_2$  ambiental ( $CO_{2ref}$ ) y (b) del vapor de agua ambiental ( $H_2O_{ref}$ ) entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.



**Figura 8.**

Relación entre la temperatura externa y el CO<sub>2</sub> de referencia entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.

centración ambiental de CO<sub>2</sub> disminuye hasta un valor de 365µmol(CO<sub>2</sub>)mol<sup>-1</sup>(aire) durante todo el tiempo de toma de la información. La disminución del valor del CO<sub>2ref</sub> se debe a dos hechos principalmente: El primero a una expansión volumétrica del aire al encontrarse a la misma presión y aumento de temperatura, disminuyendo la concentración de sus componentes minoritarios (CO<sub>2</sub>) y el segundo a la incorporación de CO<sub>2</sub> que realiza la vegetación circundante.

Si bien se presentaron diferencias estadísticas entre las condiciones ambientales externas e internas, las pruebas realizadas a las cámaras vacías y con la presencia de plantas de *Coffea arabica* L. cv. Caturra de 14 meses de edad, permiten observar que los controles de temperatura y humedad al interior logran mantener las oscilaciones día – noche de manera muy cercana a las del exterior. Lo anterior garantiza que la información de intercambio gaseoso en plantas completas y de varias especies, principalmente *Coffea arabica* L., que se mida en el sistema diseñado y construido, permitirá tener una idea muy cercana y acertada de su comportamiento bajo condiciones naturales similares. Además, las plantas podrían mantenerse durante períodos prolongados (semanas)

bajo condiciones de confinamiento, teniendo como fuente de radiación la procedente del sol, lo cual permite su crecimiento y desarrollo normal.

La ventaja de poder observar en tiempo real todas las variables medidas, tanto interna como externamente, garantiza que la información sobre el comportamiento del intercambio gaseoso en las especies estudiadas pueda ser utilizada para la generación y validación de modelos matemáticos dinámicos de simulación, que permitan explicar la forma como las plantas, principalmente las adaptadas a condiciones tropicales, responden a cambios naturales o inducidos ya sean por factores bióticos o abióticos. Tal como se menciona en la revisión bibliográfica, este tipo de sistemas han sido ampliamente utilizados para estudiar la actividad fotosintética en individuos o poblaciones de plantas, principalmente de ciclo anual.

En Colombia es el primer sistema diseñado, construido y puesto a punto, lo que indica que los resultados generados para las especies espontáneas y cultivadas, nativas o adaptadas a las condiciones tropicales, serán de importancia para determinar su potencial de captura de CO<sub>2</sub>. Además, permitirá llevar a cabo investigacio-

nes que busquen obtener plantas más eficientes en cuanto a la actividad fotosintética, principal componente de la productividad vegetal.

## AGRADECIMIENTOS

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y COLCIENCIAS por haber cofinanciado el proyecto 2251-07-002-93 por medio del cual se adquirieron los equipos y fue posible llevar a cabo dicha investigación.

Al Ing. Electrónico Mario Franco Jiménez (Manizales, Colombia) y Sr. Uriel López (Cenicafé, Química Industrial) por su valiosa colaboración en la construcción de las cámaras para medición de intercambio gaseoso. Al Dr. Jaime Arcila P. (Cenicafé, Fitotecnia) por su asesoría y al equipo de trabajo de Fisiología Vegetal de Cenicafé.

## LITERATURA CITADA

1. BUGBEE, B. Steady-State canopy gas exchange: System design and operation. *HortScience* 27 (7): 770-776. 1992.
2. CADAVID, A.M. Determinación de la tasa fotosintética y otros parámetros fisiológicos relacionados con este proceso. Caracterización de la fotosíntesis en diferentes genotipos de café. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. CHINCHINÁ. Informe anual de labores de la Disciplina de Fisiología Vegetal. 1996-1997. Chinchiná, Cenicafé. 1997.*
3. DE WIT, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 1965. 57 p.
4. FANJUL, L.; ARREOLAR, R.; MÉNDEZ C., M.P. Stomatal responses to environmental variables in shade and sun grown coffee plants in México. *Experimental Agriculture* 21 (3): 249-258. 1985.
5. FIELD, C.B.; GAMON, J.A.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of terrestrial photosynthesis. *In: SHULZE, E.D.; CALDWELL, M.M. (eds). Ecophysiology of photosynthesis. New York, Springer-Verlag, 1995. p. 511.*
6. FITTER, A.H.; HAY, R.K.M. Environmental physiology of plants. 2 ed. Londres, Academic Press, 1987. 423 p.
7. GRAPADELLI, L.C.; MAGNANINI, E. A whole-tree system for gas-exchange studies. *Hort Science* 28 (1): 41-45. 1993.
8. HOFFMAN, G.J.; PHENE, C.J.; RAWLINS, S.L. Microchamber for studying plant response to environmental factors. *Transaction of the ASAE* 12(4): 598-601. 1971.
9. HUERTA S., A. La influencia de la intensidad de la luz en la eficiencia asimilatoria y el crecimiento del café. Turrialba, IICA, 1954. 69 p. (Tesis: Magister Science).
10. JARVIS, P.G.; McNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research* 15: 1-45. 1986.
11. KNIGHT, S.L. Constructing specialized plant growth chambers for gas-exchange research: Considerations and concerns. *HortScience* 27 (7): 767-769. 1992.
12. LONG, S.P.; HALLGREN, J.E. Medición de la asimilación de CO<sub>2</sub> por las plantas en el campo y el laboratorio. *In: COOMBS, J.; HALL, D.O.; LONG, S.P.; SCURLOCK, J.M.O (eds). Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad. México, Futura S.A., 1988. p. 52-77.*
13. McKINION, J. M.; PHENE, C.J.; PARSONS, J.E. A microcomputer-based data acquisition system for meteorological measurements. *Agricultural Engineering* 59 (3): 22-23. 1978.
14. PHENE, C.J.; BAKER, D.N.; LAMBERT, J.E.; PARSONS, J.E.; McKINION, J.M. SPAR. A Soil-Plant-Atmosphere Research System. *Transactions of the ASAE* 21 (5): 924-930. 1978.
15. REIFSNYDER, W.E.; QUESTA, N.M. The free-air carbon dioxide enrichment (FACE) cotton project: A new field approach to assess the biological consequences of global change. *Agricultural and Forest Meteorology* 70(1-4): 1-342. 1994.
16. SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. Plant physiology. 4 ed. Belmont, CA, Wadsworth Publishing Company, 1992. 682 p.
17. VICKERY, M.L. Ecología de plantas tropicales. México. Ed. Limusa, 1987. 232 p.