

PROTOTIPO DE SENSOR CUÁNTICO UIC-01 PARA MEDICIONES DE RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN EL DOSEL VEGETAL

Quantum Sensor Prototype UIC-01 to Measure Photosynthetic Active Radiation in Plant Canopy

Víctor L. Barradas¹, Luis Mario Tapia-Vargas², Arturo Torrecillas-Melendreras³, Emilio Nicolás-Nicolás³ y Juan José Alarcón-Cabañero^{3†}

RESUMEN

La correcta medición de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) es la base para el estudio de fenómenos biológicos y ecológicos que ocurren en el entorno natural. El objetivo de este trabajo es presentar el prototipo UIC-01 como un instrumento de bajo costo y alta confiabilidad para la medición de RFA. El equipo UIC-01 (UNAM-INIFAP-CEBAS) se evaluó con respecto a un sensor cuántico comercial (HOBO, Onset Computer Corp. Bourne, EUA), tomado como referencia de calibración. Los resultados de dicha evaluación indicaron que ambos sensores, tanto el prototipo UIC-01 como el de referencia, no presentaron diferencias estadísticamente significativas en los promedios y varianzas registradas. Al comparar el comportamiento de dos sensores cuánticos UIC-01 también pudo observarse que las regresiones obtenidas con cada uno de ellos respecto a las medidas del sensor cuántico HOBO fueron iguales, lo que confirma la sensibilidad y repetibilidad del nuevo prototipo propuesto. Estas características, junto con el bajo costo de producción, hacen que este prototipo de sensor cuántico sea un producto de gran interés para la aplicación en la determinación de la RFA. La posible aplicación de varios de estos sensores a la vez permitiría realizar un estudio adecuado de la distribución de la luz en el dosel vegetal con un costo económico muy bajo.

Palabras clave: recepción de luz, fisiología vegetal, nuevos instrumentos.

SUMMARY

Photosynthetically active radiation (PAR) is an important biological and ecological factor, therefore, its measurement is very important for studying those phenomena. The main objective of this work is to present a quantum sensor prototype denominated UIC-01, an inexpensive and good performance sensor to measure PAR. This sensor UIC-01 (UNAM-INIFAP-CEBAS) was calibrated and compared with a commercial quantum sensor (HOBO, Onset Computer Corp. Bourne, USA). Results indicate that the two sensors are similar, registering the same means and variances. Furthermore, when two UIC 01 sensors were compared with the commercial quantum sensor, their regressions were similar, confirming the sensitivity and repetition of the new prototype. These characteristics, together with low production cost, make UIC-01 quantum sensor a reliable instrument for measuring PAR. Because of this, it is possible to employ many quantum sensors UIC-01 to measure PAR more precisely in plant canopies at a very low cost.

Index words: light reception, plant physiology, new equipment.

INTRODUCCIÓN

La distribución de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en las plantas tiene un efecto sustancial en su crecimiento y desarrollo debido a su influencia en los procesos de biosíntesis, intercambio gaseoso y transpiración (Torrecillas *et al.*, 1999). El desarrollo de modelos de predicción de productividad de las plantas, así como los de transferencia de energía, requieren de la determinación precisa del microclima lumínico; por ello, la información necesaria no sólo se limita a la luz que

¹ Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Cultural Universitario, México, D.F.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Latinoamericana 1101, Uruapan, Michoacán, México.

³ Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Apdo. 164, 30100 Espinardo, Murcia, España

[†] Autor responsable (jalarc@cebas.csic.es)

llega a las hojas exteriores de la planta, sino a todas ellas.

Una forma de caracterizar y cuantificar el ambiente lumínico es la de instalar en una planta una serie de sensores fijos distribuidos al azar y registrar continuamente los niveles de RFA. Sin embargo, el alto costo y el gran número de unidades que se requieren para medir un intervalo amplio de ángulos de interceptación de RFA en espacio y tiempo, les convierte en un equipamiento que puede ser prohibitivo para cualquier presupuesto económico.

De esta manera, la construcción de un sensor adecuado para realizar determinaciones precisas del clima lumínico debe reunir ciertas condiciones, para que cumpla con el objetivo antes descrito, como la de ser del tipo fotoeléctrico o fotodiodo, con una respuesta lineal de 400 a 700 nm de longitud de onda, tener un tamaño adecuado para poder ser instalado en la fronda de la planta, ser insensible a los cambios térmicos, tener una respuesta rápida a los cambios de RFA y una respuesta angular Lambertiana, es decir tener una fácil corrección del coseno.

En algunos estudios en los cuales se han utilizado este tipo de sensores ha quedado demostrada su aplicación práctica, cuando se requiere de una gran cantidad de ellos. Estos estudios comprenden el efecto de los rayitos de sol (rápidos cambios de RFA en el tiempo y en el espacio) en la asimilación de CO₂ y en la conductancia estomática (Barradas y Jones, 1996; Barradas *et al.*, 1994) y el efecto de la estructura de la fronda en el clima lumínico (Barradas *et al.*, 1998).

En el presente trabajo se describe la construcción de un sensor cuántico para su uso en el campo y presenta los resultados de su calibración y comparación con un sensor comercial.

REVISIÓN DE LITERATURA

La determinación del clima lumínico en una comunidad vegetal ha sido un problema muy complejo debido a su variabilidad espacial y temporal, por un lado, y, por el otro, al desarrollo de una tecnología apropiada. Inicialmente, el clima lumínico se determinaba con mediciones realizadas con fotómetros, sin embargo, la respuesta de este sensor a las diferentes longitudes de onda del espectro visible no es adecuado (Bainbridge *et al.*, 1966), ya que se requiere que éste posea una respuesta lineal en el espectro de la RFA. Posteriormente, se optó por combinar fotoceldas y filtros ópticos que

aproximaran la respuesta requerida midiendo la irradiación en el espectro de la RFA o la irradiación fotónica (Federer y Tanner, 1966; McPherson, 1969). No obstante, el error introducido en estos arreglos es considerable (McCree, 1972). Finalmente, la implementación de una fotocelda azul de silicio, un filtro óptico que permite sólo el paso de la radiación de 400 a 700 nm, una pieza de cristal absorbedor de calor y un filtro de gelatina Wratten 85A, montados en un armazón metálica de gran precisión que incluye la corrección del coseno, permitió medir la radiación fotosintéticamente activa con la precisión adecuada (Biggs *et al.*, 1971). En la actualidad, todos los sensores cuánticos comerciales se basan en este principio de operación.

No obstante, y aunque en la actualidad se cuenta con un sensor apropiado para la medición de la RFA, la heterogeneidad del dosel puede generar grandes errores en la determinación del clima lumínico. Para minimizar ese error de medición, se ha sugerido la utilización de varias técnicas, como la de usar sensores grandes como los solarímetros de tubo (Szeicz *et al.*, 1964) que, al promediar el valor de la radiación en el espacio muestreado por el sensor, el error asociado a la heterogeneidad del dosel se minimiza. Otra técnica empleada es la de utilizar una gran cantidad de sensores como el medidor de transmisión de radiación en el dosel vegetal (Williams y Austin, 1977) o el ceptómetro comercial. Estos instrumentos constan de un gran número de sensores pequeños en una sonda lineal que puede insertarse en el follaje. Una alternativa es la de mover sensores a través del cultivo tomando mediciones a diferentes posiciones (Norman y Jarvis, 1974), o la de instalar varios sensores distribuidos en el follaje de la planta o de la comunidad (Chazdon y Fetcher, 1984; Easter y Spies, 1994; Gendron *et al.*, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

El prototipo de sensor cuántico se diseñó y armó en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, localizado en el Campus Universitario de Espinardo en Murcia, España. Los componentes básicos del prototipo UIC-01 (UNAM-INIFAP-CEBAS) fueron un fotodiodo GaAsP (galio, arsénico, fósforo), y un amplificador operacional.

El fotodiodo es sensible a la radiación electromagnética entre 300 y 680 nm, con un pico de máxima respuesta a 600 nm, lo que permite captar

la radiación fotosintéticamente activa. Debido a esta respuesta espectral, el fotodiodo GaAsP puede presentar un error alto, ya que no es un sensor cuántico perfecto (ningún sensor cuántico comercial lo es). Sin embargo, este error espectral se minimiza fácilmente al calibrar el fotodiodo bajo luz solar y el error que puede introducirse es hasta de 3.2% cuando se realizan mediciones en el interior de la fronda. De acuerdo con Pearcy (1989), este error es tolerable debido al beneficio de poder usar un gran número de sensores de bajo costo. El error que presenta en función de la temperatura es de cerca de 0.08% por °C. Además, tiene un tamaño adecuado para ser instalado en cualquier punto del dosel vegetal o incluso encima de las hojas. El amplificador es totalmente lineal y opera en condiciones térmicas desde -55 a 125 °C y requiere de una alimentación de ± 2 a ± 20 V de corriente directa, lo que permite una buena adaptación a las condiciones naturales y una escasa vulnerabilidad ambiental.

El funcionamiento de este prototipo UIC-01 es el siguiente: el fotodiodo recibe una señal luminosa que transforma en una corriente eléctrica, la señal es dirigida al módulo detector del circuito, pasa al módulo amplificador y se emite como una señal eléctrica, V_{OUT} , que puede evaluarse directamente o bien almacenarse en un sistema de adquisición de datos (SAD) que registra

la señal en el tiempo correspondiente (Figura 1). En el presente caso, el SAD utilizado fue un Delta-T Logger (Delta-T Devices, LTD. Cambridge, UK.). El tiempo utilizado para el registro y almacenamiento de datos fue de un minuto.

El sensor cuántico UIC-01, una vez armado, se ensambló en una caja de policarbonato, a la que se hicieron las debidas modificaciones para permitir el acceso de los cables eléctricos conectados al detector de luz (fotodiodo), la alimentación (± 12 VDC) y la salida para conectarse al SAD. El empleo de varios fotodiodos con una única caja amplificadora y de alimentación conectados también a una SAD dan lugar a una serie de sensores que permiten realizar un estudio realista de la distribución de la luz en el dosel vegetal (Figura 1).

El proceso de calibración se inició con la exposición del prototipo UIC-01 a la radiación solar incidente, en un día con cielo nublado y otro despejado, de forma alterna. El prototipo UIC-01 se conectó a un SAD Delta-T (Delta-T Corp, Cambridge, UK). Como referencia de calibración, se utilizó un sensor inteligente de RFA (HOBO, Onset Computer Corp. Bourne, MA, USA) conectado a un micro SAD (H08-001-02, HOBO, Onset Computer Corp. Bourne, USA). Las lecturas y el almacenamiento de datos de ambos sensores se realizaron cada minuto en un intervalo de 10 h. Ambas mediciones

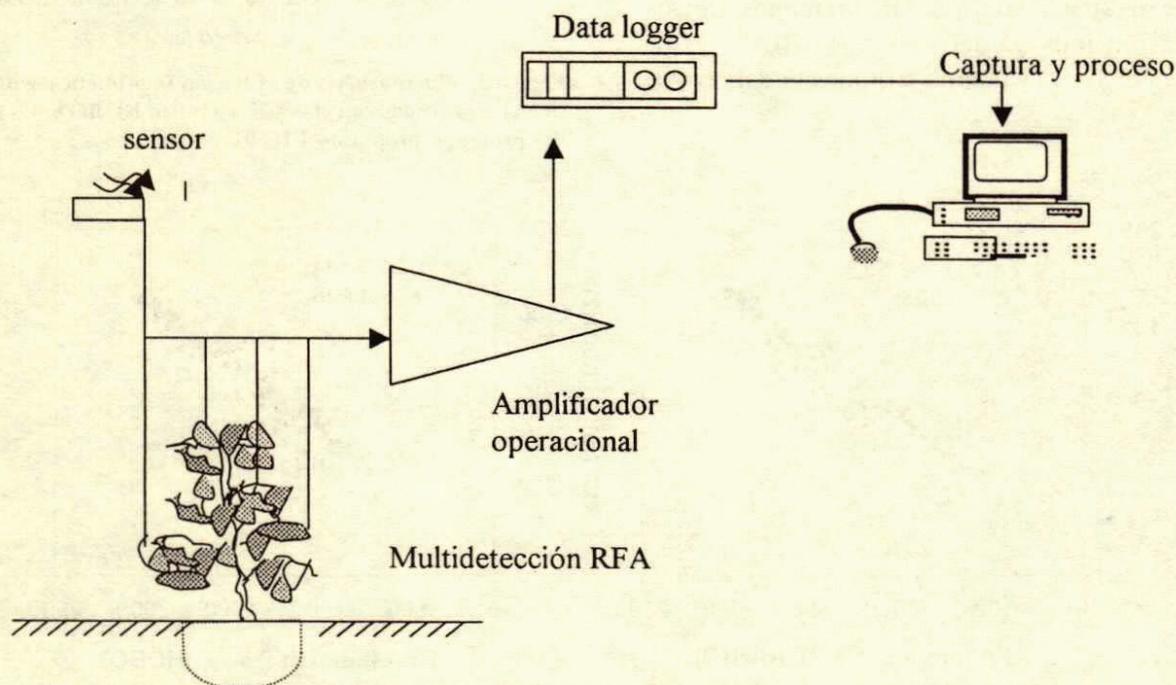


Figura 1. Diagrama en bloques del prototipo de sensor cuántico UIC-01 incluyendo una sola medición o una serie de mediciones de RFA en el dosel vegetal.

se ajustaron, por el método de mínimos cuadrados, a una regresión simple para obtener los parámetros de calibración (sensibilidad y corrimiento del cero).

Para comprobar su utilidad como herramienta para el registro de la RFA en el interior de un dosel vegetal en campo, se colocaron, de forma aleatoria, hasta 15 fotodiodos diferentes en la fronda de un árbol joven de durazno, plantado en la finca experimental del CEBAS (Santomera, Murcia) y se generó un histograma de valores de intensidad de RFA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del Sensor Cuántico UIC-01

La Figura 2 muestra las regresiones entre las mediciones de RFA realizadas con el sensor HOBO y dos sensores UIC-01. Ambas regresiones simples mostraron un ajuste adecuado, con valores de coeficientes de determinación, $r > 0.95$ ($P \leq 0.001$). Se encontró también que los parámetros (pendiente y ordenada al origen) de las ecuaciones lineales ajustadas fueron iguales, de acuerdo con el valor del estadístico t de Student, siendo para las pendientes $t_{(300, 0.001)} = 0.7273$ y para las ordenadas al origen $t_{(300, 0.001)} = 0.2239$. Con ello, las ecuaciones ajustadas tienen los mismos coeficientes de regresión, por lo que las ecuaciones son iguales y las mediciones son similares en todos los prototipos. De esta manera, la sensibilidad del prototipo UIC-01 es de $0.75 \text{ mV}/\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y con un corrimiento del cero de $95 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

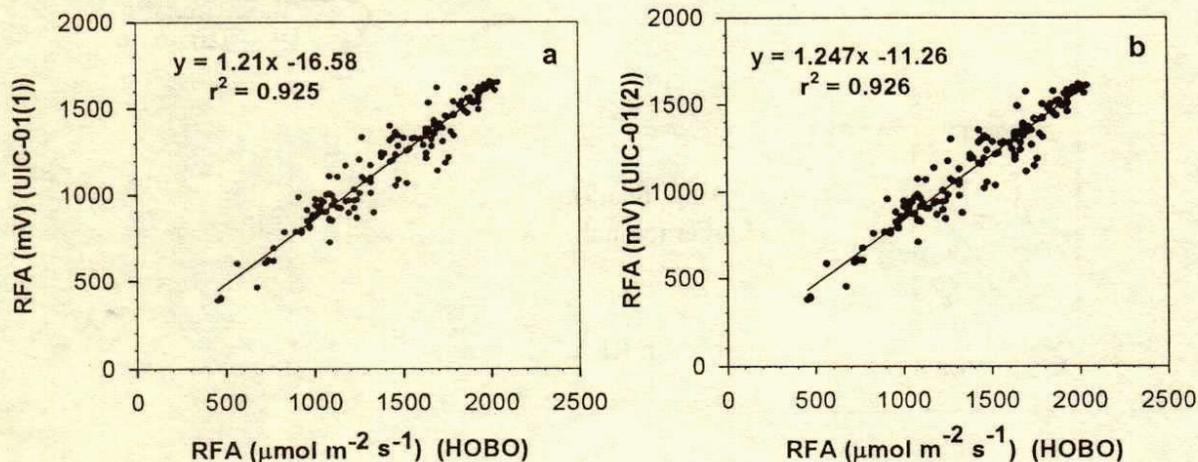


Figura 2. Regresión lineal (calibración) entre los valores de RFA medidos por el sensor HOBO en unidades de flujo cuántico ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y por los sensores (a) UIC-01(1) y (b) UIC-01(2) en unidades de voltaje (mV). Mediante las ecuaciones lineales encontradas, los valores en unidades de voltaje se transforman a unidades de flujo cuántico.

Comparación del Prototipo UIC-01

Se realizó la comparación entre los valores de radiación fotosintéticamente activa registrados con los sensores del prototipo (UIC-01) y las medidas obtenidas con un sensor de referencia ya comercializado (HOBO). La aproximación entre ambos tipo de registro fue excelente (Figura 3). Los intervalos de fluctuación, dados por los continuos nublados y despejados generados durante el tiempo de calibración, fueron también registrados por los dos prototipos presentados. Ello indica que el tiempo de atraso del equipo es adecuado para captar, de forma instantánea, tanto valores bajos de RFA ($400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), como valores altos ($2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

El análisis estadístico efectuado a los datos medidos por el sensor HOBO y por los dos sensores UIC 01,

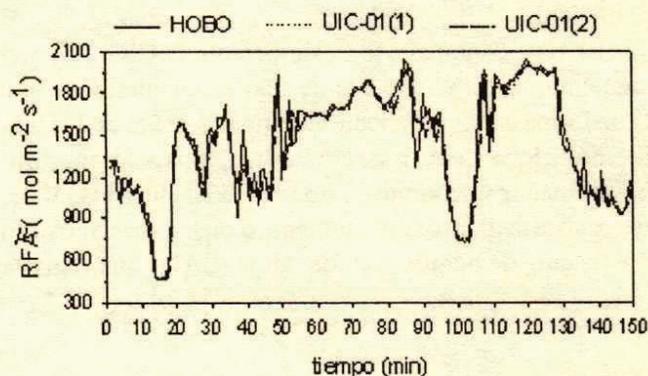


Figura 3. Fluctuaciones de radiación fotosintéticamente activa (RFA) registradas con el sensor cuántico HOBO y dos sensores del prototipo propuesto UIC-01.

Cuadro 1. Comparación de los valores de radiación fotosintéticamente activa (RFA) registrados con un sensor cuántico HOBO y dos sensores del prototipo propuesto UIC 01.

Medidor RFA	n	Media	Desviación estándar	Prueba t	Prueba Barlett	Prueba F
HOBO	150	1423.8	399			
UIC-01 (1)	150	1423.7	384	0.0 ns	1.0 ns	1.08 ns
UIC-01 (2)	150	1423.8	385	0.0 ns	1.0 ns	1.07 ns

n = número de observaciones; ns: no significativo a $P > 0.05$. Los valores de RFA son los presentados en la Figura 3.

muestra claramente que no existe diferencia entre las medias ni entre las varianzas de las mediciones, por lo que los valores registrados con el prototipo UIC-01 y con el sensor HOBO son iguales (Cuadro 1). La "prueba de t" indica la igualdad de los valores promedio. Las varianzas de los valores generados con el sensor HOBO y el prototipo UIC-01 fueron iguales de acuerdo con la "prueba de Barlett". Por último, "la prueba de F", realizada sobre las desviaciones estándar, indica también igualdad en las medias de los sensores cuánticos evaluados.

Desempeño del Sensor Cuántico UIC-01

En la Figura 4, se muestran los registros obtenidos por tres sensores cuánticos UIC-01 en la fronda de un árbol de durazno (*Prunus persica*). Los datos corresponden a las medidas realizadas a lo largo de un día y se aprecia como la distribución de RFA varió de forma importante en función de la localización de los fotosensores en diferentes sitios en el interior del árbol. Con este tipo de mediciones no sólo es posible realizar determinaciones o estudios del clima lumínico con

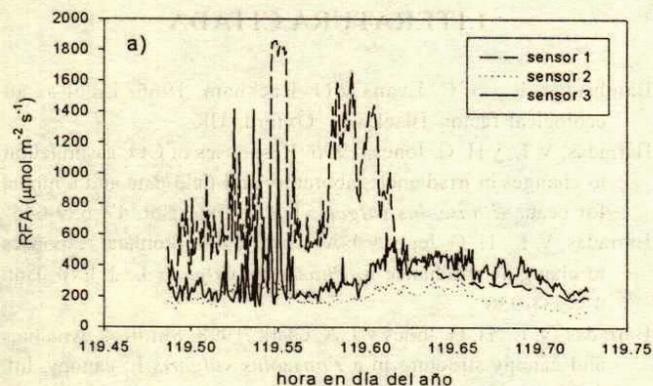


Figura 4. Variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) a través del día en tres localidades del dosel de un árbol de durazno (*Prunus persica*) usando tres sensores del prototipo propuesto UIC-01. Las mediciones se realizaron cada 10 s y se registraron sus promedios cada minuto.

su aplicación a la biosíntesis o a las transferencias de energía, también es posible realizar determinaciones de la estructura del dosel. Por ejemplo, en la Figura 4, las tres trazas correspondientes a las marchas de registro de RFA durante el día pueden sugerir la exposición de los sensores a la luz solar directa, tanto en el tiempo, como en el espacio, con base en el área foliar que existe por encima del sensor, es decir, tendría una estimación de las discontinuidades del dosel y se podrían calcular las fracciones abiertas o cerradas de follaje de la planta. Si los sensores se encontraran a diferentes alturas también podría calcularse el área foliar de cada uno de los estratos, aplicando un modelo adecuado.

Otros Estudios, Otras Investigaciones

Otra aplicación que puede tener un arreglo de varios sensores cuánticos UIC-01, es la que a partir de la determinación de la distribución de la luz en la fronda de la planta, se evalúe y se optimice la arquitectura de los árboles mediante la manipulación de su dosel con el fin de aumentar su productividad. En la Figura 5, se muestra un histograma de la frecuencia absoluta en función de diferentes intensidades de RFA y que se construyó con los valores presentados en la Figura 4. En este histograma puede verse claramente que la posición de los sensores, con respecto a la arquitectura del árbol, juega un papel importante en la cantidad de RFA interceptada, mientras que los Sensores 2 y 3 captaron mayormente radiación de baja intensidad (de 200 a 800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con una mayor frecuencia en 200 y 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, el Sensor 1 también captó intensidades de RFA más altas de hasta 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En este caso, la arquitectura de la planta hace que las hojas situadas o aledañas a los Sensores 2 y 3 puedan tener una mejor asimilación de CO_2 (A) que las hojas situadas donde se encuentra el Sensor 1, de acuerdo con las curvas generales de respuesta de A a RFA, ya que el mayor incremento de A se da en la porción lineal de la mencionada curva que comprende

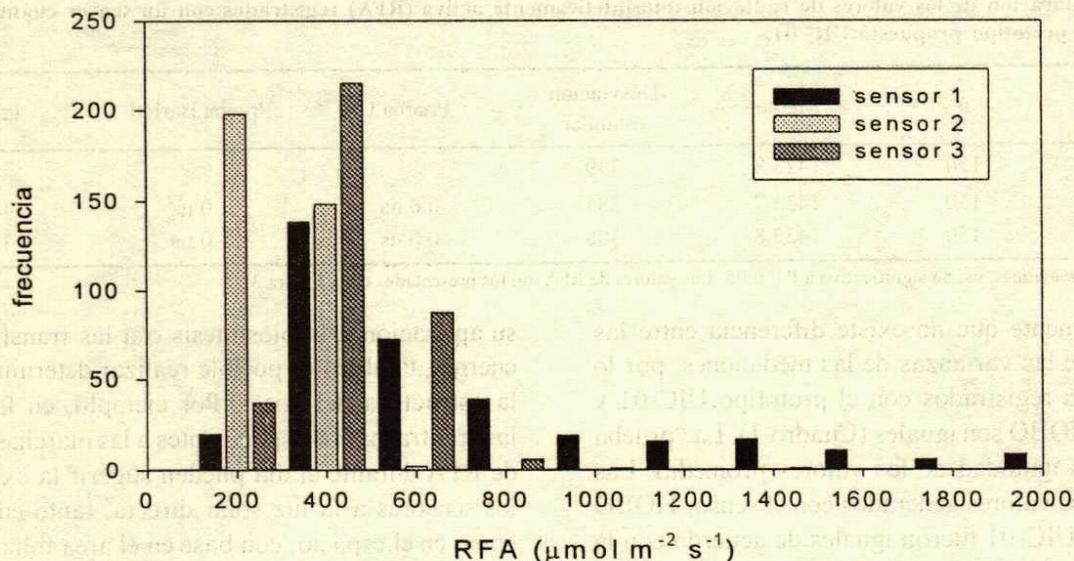


Figura 5. Frecuencia absoluta de la intensidad de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) registrada por tres sensores cuánticos UIC-01, a través del día, en tres sitios del dosel de un árbol de durazno (*Prunus persica*). Las mediciones se realizaron cada 10 s y se registraron sus promedios cada minuto.

aproximadamente de 50 a 300-400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Jones, 1992).

Este sensor UIC-01 también puede usarse para determinar la RFA en estaciones climatológicas, invernaderos, cámaras de crecimiento, viveros, y otras aplicaciones.

Costo del Equipo

Los costos de material del equipo propuesto se presentan en el Cuadro 2. El costo total es de aproximadamente 22.00 Euros, lo que indica que está al alcance de cualquier presupuesto y de que puede ser adquirido para su operación y utilización a precios relativamente bajos.

CONCLUSIONES

- El equipo UIC-01 presentó una buena correlación en sus medidas con los registros del sensor cuántico de referencia $r > 0.95$ ($P \leq 0.001$), por lo que puede ser validado como un sensor eficaz en la determinación de RFA.
- La instalación de varios sensores en la fronda de cualquier planta permitirá evaluar, de forma precisa, la distribución de luz en el dosel vegetal.
- Los costos del equipo propuesto permiten estar al alcance de bajos presupuestos, sin detrimento en la calidad de la medición de RFA.

Cuadro 2. Costos aproximados de los materiales necesarios para el armado del UIC 01.

Material	Cantidad	Costo unitario	Costo
Fotodiodo	1	4	4 Euros
Amplificador	1	3	3 Euros
Miscelánea [†]			15 Euros
Total			22 Euros

[†] Se incorporan baterías y cajas que pueden servir para la utilización e instalación de varios sensores.

LITERATURA CITADA

- Bainbridge, R., G. C. Evans y O. Rackham. 1966. Light as an ecological factor. Blackwell. Oxford, UK.
- Barradas, V. L. y H. G. Jones. 1996. Responses of CO_2 assimilation to changes in irradiance: laboratory and field data and a model for beans (*Phaseolus vulgaris* L.). J. Exp. Bot. 47: 639-645.
- Barradas, V. L., H. G. Jones y J. A. Clark. 1994. Stomatal responses to changing irradiance in *Phaseolus vulgaris* L. J. Exp. Bot. 45: 931-936.
- Barradas, V. L., H. G. Jones y J. A. Clark. 1998. Sunfleck dynamics and canopy structure in a *Phaseolus vulgaris* L. canopy. Int. J. Biometeorology 42: 34-43.
- Biggs, W. W., A. R. Edison, J. W. Eastin, J. W. Brown, J. W. Maranville y M.D. Clegg. 1971. Photosynthesis light sensor and meter. Ecology 52: 126-131.
- Chazdon, R. L. y N. Fetcher. 1984. Photosynthetic light environment on a lowland tropical forest in Costa Rica. J. Ecol. 72: 553-564.

- Easter, M. J. y T. A. Spies. 1994. Using hemispherical photography for estimating photon flux density under canopies and in gaps in Douglas-fir forests of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.* 24: 2050-2058.
- Federer, C. A. y C. B. Tanner. 1966. Sensors for measuring light available for photosynthesis. *Ecology* 47: 654-657.
- Gendron, F., C. Messier y P. G. Comeau. 1998. Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agric. For. Meteorology* 92: 55-70.
- Jones, H. G. 1992. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- McCree, K. J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorology* 10: 443-453.
- McPherson, H. G. 1969. Photocell-filter combinations for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorology* 6: 347-356.
- Norman, J. M. y P. G. Jarvis. 1974. Photosynthesis in sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). III. Measurements of canopy structure and interception of radiation. *J. App. Ecol.* 11: 375-398.
- Pearcy, R. W. 1989. Radiation and light measurements. pp. 97-116. *In: Pearcy, R. W., J. R. Elheringer, H. A. Mooney y P. W. Rundell (eds.). Plant physiological Ecology: field methods and instrumentation*. Chapman and Hall. London, UK.
- Szeicz, G., J. L. Monteith y J. M. Dos Santos. 1964. Tube solarimeter to measure radiation among plants. *J. App. Ecol.* 1: 169-174.
- Torreillas, A., R. Galego, A. Pérez-Pastor y M. C. Ruiz-Sánchez. 1999. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions. *J. Agric. Sci.* 132: 445-452.
- Williams, B. A. y R. B. Austin. 1977. An instrument for measuring the transmission of shortwave radiation by plant canopies. *J. App. Ecol.* 14: 987-992.