

## ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE UN RADIÓMETRO PAR FABRICADO POR CNEA CON RESPECTO A UNO COMERCIAL

M.J. Denegri<sup>1,2</sup>, R. Righini<sup>2</sup>, H. Grossi Gallegos<sup>2</sup>, C.G. Bolzi<sup>4</sup>, M.G. Martínez Bogado<sup>3,4</sup>, M.J.L. Tamasi<sup>3,4</sup>

<sup>2</sup> Grupo de Estudios de la Radiación Solar - Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable - Universidad Nacional de Luján  
Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7 (6700) Luján,  
Buenos Aires, Argentina, Tel.: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

<sup>4</sup> Grupo Energía Solar, Gerencia de Investigación y Aplicaciones, Centro Atómico Constituyentes - CNEA  
Av, General Paz 1499, (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina, Tel.: (54-11) 6772-7837

Recibido: 02-08-09; Aceptado: 20-09-09.

**RESUMEN.-** Se estudia el comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por el Grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) frente a un radiómetro PAR comercial de la firma Kipp & Zonen. Se analizan las integrales diarias, horarias y cada diez minutos. Se estudia el comportamiento de su constante de calibración para diferentes alturas solares, cobertura de nubes, y épocas del año. Tras 215 días de medición se concluye que el desempeño del equipo de CNEA es comparable al comercial, mostrando una excelente estabilidad en su constante de calibración durante todo el período analizado y en todas las situaciones consideradas.

**Palabras Clave:** Radiación fotosintéticamente activa, medición directa, CNEA, Kipp & Zonen

### COMPARATIVE STUDY OF THE BEHAVIOR OF A PAR RADIOMETER MADE BY CNEA WITH RESPECT TO A COMMERCIAL ONE.

**ABSTRACT.-** The behavior of a PAR radiometer made by CNEA is compared with a Kipp and Zonen PAR radiometer. Daily, hourly and every ten minutes integrals are analyzed. The behavior of the calibration constant for different solar altitudes, cloud cover, and times of the year is studied. After 215 days of measurement one concludes that the performance of the CNEA equipment is comparable with the commercial sensor, showing an excellent stability in its calibration constant during the whole analyzed period and in all analyzed situations.

**Keywords:** Photosynthetically active radiation, direct measurement, CNEA, Kipp & Zonen.

### 1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar está íntimamente vinculada con el crecimiento y la productividad de las plantas, especialmente en la fracción del espectro comprendida entre 400 y 700 nm, definida como radiación fotosintéticamente activa (PAR). La radiación PAR incidente y absorbida convertida en energía química libre por la fotosíntesis, es vital en los sistemas biológicos. En esa banda del espectro hay una importante absorción de luz por la clorofila de las plantas, presentándose en ciertas sub-regiones marcados efectos morfogénéticos y ontogénéticos (Larcher, 1977). De la medición del PAR puede obtenerse información que permita, por ejemplo, estimar el balance energético de un determinado sistema biológico, o el crecimiento de un cultivo en particular (Magrin *et al.*, 1991).

Si bien la radiación PAR es una de las informaciones requeridas para estudiar y modelar el crecimiento de los

cultivos, no es frecuente contar con mediciones directas de esta variable, ya que no es una de las medidas de rutina en las estaciones meteorológicas. En general suele disponerse del dato de irradiación global (medida o estimada).

Para la medición directa del PAR existen sensores desarrollados a tal efecto, como el LI-190SA fabricado por LI-COR, y el PAR Lite, de la empresa KIPP & ZONEN. En ambos casos se utiliza como sensor un fotodiodo de silicio al que se modifica su respuesta y se le agrega un filtro para proporcionar una respuesta "cuántica" en el rango de longitudes de onda que van de 400 a 700 nm (Righini y Grossi Gallegos, 2005).

Desde el año 1998 la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), a través del Grupo Energía Solar (GES) del Centro Atómico Constituyentes, ha emprendido la fabricación de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo, tanto para la medición de la radiación solar global como para el PAR (Bolzi *et al.*, 2008).

<sup>1</sup> Becaria de formación de la ANPCyT

### 1.1. Construcción de los radiómetros

Se construyeron en la CNEA prototipos de radiómetros PAR (Figura 1) que constan fundamentalmente de una base de aluminio y una cubierta de vidrio esmerilado. El elemento sensor propiamente dicho es básicamente una celda fotovoltaica de silicio diseñada para esta función con un área activa de  $0,13 \text{ cm}^2$  a la que se le adhirió un filtro comercial utilizando el mismo adhesivo ya probado en los solarímetros fotovoltaica de silicio diseñada para esta función con un área activa de  $0,13 \text{ cm}^2$  a la que se le adhirió un filtro comercial utilizando el mismo adhesivo ya probado en los solarímetros fotovoltaicos desarrollados en la CNEA (Bolzi *et al.*, 2002), y cuya transmitancia espectral es mostrada en la Figura 2. El filtro fue cortado de manera que cubra sólo las dimensiones activas del sensor y así minimizar la superficie del filtro a utilizar. Sobre el filtro, se colocó un vidrio esmerilado para superficie de la cubierta de vidrio. La salida eléctrica de los mismos se encuentra en el rango de 0 a 12 mV y consta de dos cables que salen lateralmente de la base de aluminio para su conexión a un sistema de adquisición de datos o directamente a un multímetro.



Fig. 1. Radiómetro PAR desarrollado en el Grupo Energía Solar de la CNEA.

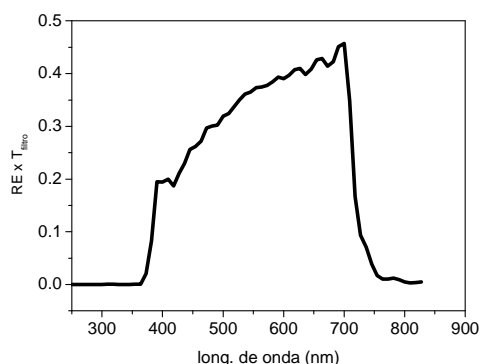


Fig. 2. Transmitancia en función de la longitud de onda del filtro empleado en un radiómetro PAR de CNEA.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de este radiómetro PAR desarrollado por la CNEA, con respecto a un radiómetro PAR de Kipp & Zonen, analizándose las integrales diarias, horarias y cada diez minutos y su constante de calibración en distintas situaciones: en función de la altura solar, del índice de claridad (Kt) y de la época del año.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El radiómetro usado como referencia para la calibración del sensor de CNEA fue el PAR-Lite, de Kipp & Zonen. Durante el período en que se realizó el estudio, se analizaron las correlaciones mensuales entre las integrales diarias de este último equipo y las de radiación global medidas con un piranómetro CIMEL CE 180. Dado que las integrales diarias de PAR se relacionan linealmente con las de global (Righini y Grossi Gallegos, 2005), la persistencia de la pendiente de la recta de correlación es indicativa de la estabilidad de la constante propia del sensor PAR-Lite.

El piranómetro CIMEL CE 180 es calibrado periódicamente mediante el método de tapado/destapado contra el pirheliómetro absoluto TMI Mk VI N° 67605, patrón del Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar).

La información utilizada para las calibraciones corresponde al período comprendido entre el 25 de septiembre de 2008 y el 9 de junio de 2009 (un total de 215 días) realizadas en la estación de medición de radiación solar del GERSolar en la Universidad Nacional de Luján.

Un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR10X mide los voltajes provenientes de los sensores una vez por segundo, almacenando las integrales de las señales cada diez minutos. Todas las calibraciones se hicieron empleando integrales diarias, horarias y valores integrados cada diez minutos.

Para el estudio de las correlaciones bajo distintas condiciones de cobertura de nubes se dividieron los datos en tres categorías en función del índice de claridad Kt. Se consideró como condición de cielo descubierto un  $Kt \geq 0.7$ , el cielo cubierto estuvo caracterizado por valores de  $Kt < 0.3$  y el resto de los casos quedaron comprendidos en el intervalo intermedio.

El estudio de posibles variaciones estacionales en los valores de la constante de calibración se realizó analizando valores en cuatro períodos caracterizados por la declinación solar. Así se analizaron datos separando en: Noviembre, Diciembre y Enero (asociado al solsticio de verano); Mayo, Junio y Julio (asociado al solsticio de invierno); Agosto, Septiembre y Octubre; Febrero, Marzo y Abril (asociados a los equinoccios).

El análisis en función de la altura solar fue hecho considerando intervalos de  $10^\circ$ .

Luego, para cada categoría del índice de claridad Kt se volvió a realizar un análisis para estudiar posibles variaciones en la constante en función de las estaciones y del ángulo de elevación solar. De igual manera se comparó la constante para las distintas alturas solares en función de la época del año.

En todos los casos el flujo registrado por los instrumentos se mide en micromoles de fotones (o microEinteins) por metro cuadrado y por segundo, definido como:

$$1 \text{ E} = N_A \cdot h \cdot f = \text{energía de 1 mol de fotones}$$

en donde  $N_A = 6.023 \times 10^{23}$  es el número de Avogadro,  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  (J s) la constante de Planck y  $f$  la frecuencia de la radiación incidente.

### 3. RESULTADOS

En primer lugar, en la Figura 3, se muestra la correlación existente entre las integrales diarias del sensor PAR Kipp & Zonen y el piranómetro CIMEL CE 180. Los datos analizados comprenden un total de 1180 días entre marzo de 2006 y agosto de 2009. En la Figura 4 se presentan las pendientes de las rectas de correlación calculadas mes a mes durante todo el período analizado.

Basándonos en lo mostrado en estas figuras, podemos decir que la correlación lineal entre las mediciones del PAR Kipp & Zonen y las del CIMEL se mantiene durante todo el período estudiado, observándose que la constante de calibración no experimenta variaciones importantes mes a mes, manteniendo su valor dentro del rango de error del 5% que el propio proceso de comparación lleva implícito.

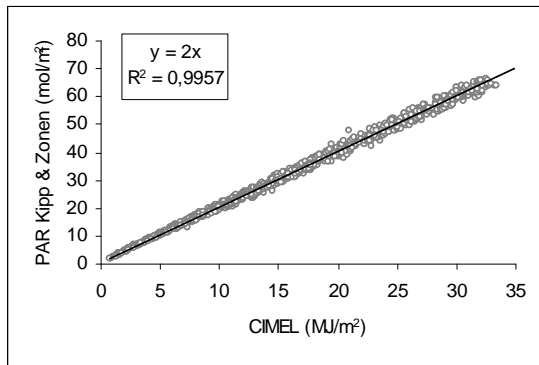


Fig. 3. Integrales diarias del radiómetro PAR Kipp & Zonen versus el piranómetro CIMEL CE 180

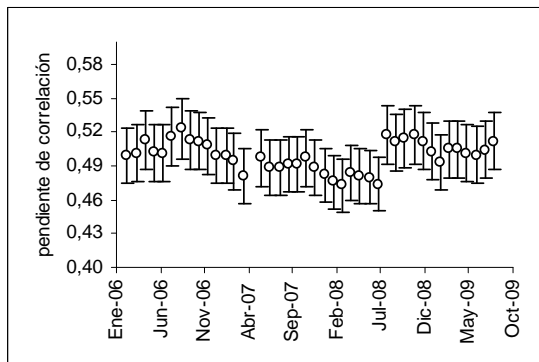


Fig. 4. Constantes de la correlación entre las integrales diarias del radiómetro PAR Kipp & Zonen y el piranómetro CIMEL. Las barras de error muestran la incerteza del 5% propia del proceso de calibración

Por lo tanto, en función de lo expuesto, es posible concluir que el radiómetro PAR Kipp & Zonen contra el cual se calibró el sensor de CNEA ha mantenido su constante de calibración estable durante el período analizado.

#### 3.1. Cálculo de la constante del PAR CNEA en base diaria, horaria y cada diez minutos

En las Figuras 5a) a 5c) se presentan las correlaciones establecidas entre los valores registrados con el sensor PAR Lite y el PAR CNEA trabajando en base diaria, horaria y

cada diez minutos. A partir de cada uno de estos gráficos se calcularon las constantes de calibración para el sensor PAR de CNEA, las cuales se muestran en la Figura 6, donde puede verse que las diferencias entre las constantes no son apreciables, ya que son menores que los errores absolutos de la estimación de cada una de ellas (5.5, 5.1 y 5.0% para los cálculos en base diaria, horaria y cada diez minutos respectivamente). Se desprende de este hecho que el comportamiento del sensor PAR CNEA es similar, ya sea que se lo utilice para calcular integrales diarias, horarias o cada diez minutos, comportamiento deseable para un radiómetro.

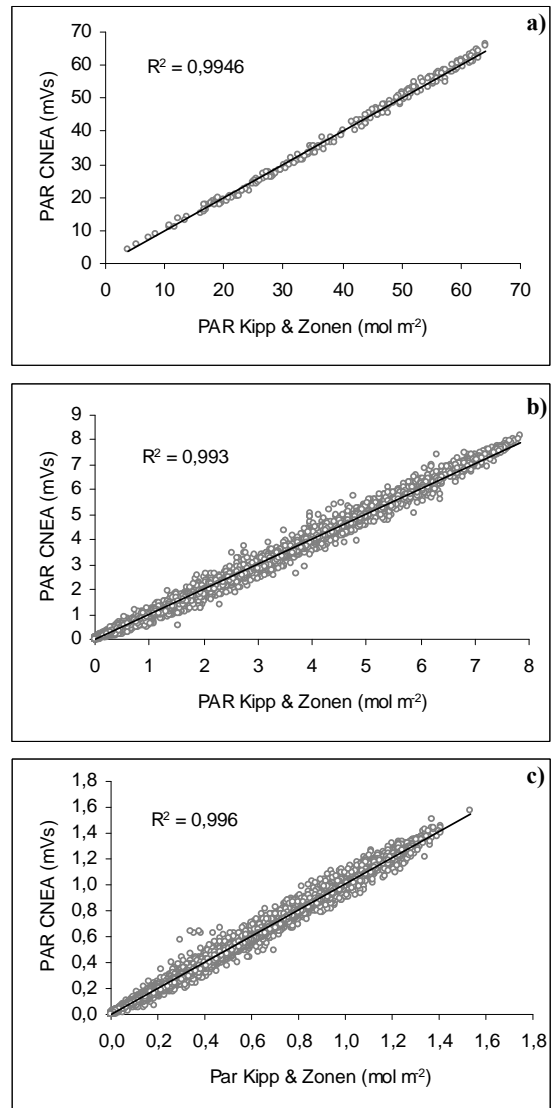


Fig. 5. Valores a) diarios, b) horarios y c) cada diez minutos de las integrales del sensor PAR CNEA en función del flujo de fotones en el rango PAR

#### 3.2. Análisis de las constantes en función del índice de claridad (Kt)

En la Figura 7 se presentan, para las tres categorías del índice de claridad, los valores de la constante de calibración obtenidos para el sensor PAR de CNEA, acompañados de los errores absolutos de la pendiente.

El valor de la constante de calibración en condiciones de cielo parcialmente cubierto, es inferior al obtenido para las condiciones de cielo cubierto o despejado, en las tres escalas de tiempo empleadas, pero esta diferencia no es apreciable si se consideran los errores absolutos de la pendiente, que se encuentran en el orden del 6.5% cuando se trabaja en base diaria, 5.5% en base horaria y 5.0% cuando se usan las integrales cada diez minutos.

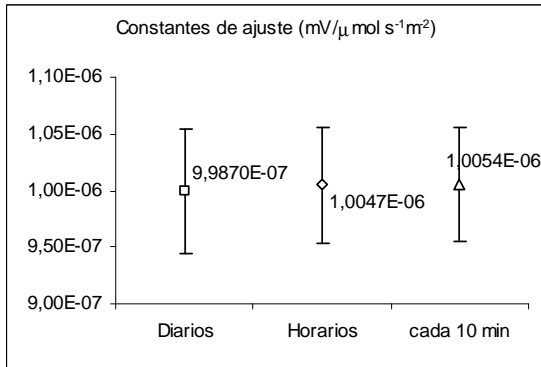


Fig. 6. Constantes de la correlación lineal entre el sensor PAR de CNEA y el PAR Kipp & Zonen. Las barras muestran el error cometido en el cálculo de las mismas

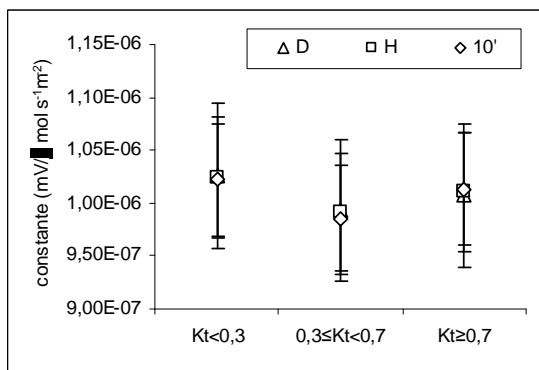


Fig. 7. Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función del índice de claridad Kt, calculadas en base diaria (Δ), horaria (□) y cada diez minutos (◇).

### 3.3. Análisis de las constantes en función de la estación del año

En la Figura 8 se presentan los valores estacionales de las constantes, representadas con su error, que fue del 5% al trabajar con datos horarios o cada diez minutos, y del 6% con datos diarios.

Se observa una disminución en el valor de la constante de calibración desde la primavera hacia el invierno, pero esta diferencia no es importante si consideramos los errores de medición y estadístico, ya que los errores absolutos son superiores a cualquier variación estacional que pueda detectarse en las constantes de ajuste. Algo a destacar, y que podría estar influyendo en este comportamiento, es que la serie de datos comienza el 25 de septiembre, y por lo tanto en el primer trimestre dominan las características del mes de Octubre, asemejándose más al trimestre de verano (NDE)

que al asociado al equinoccio de otoño (FMA), que es lo que se hubiese esperado si se contara con los datos desde el mes de Agosto.

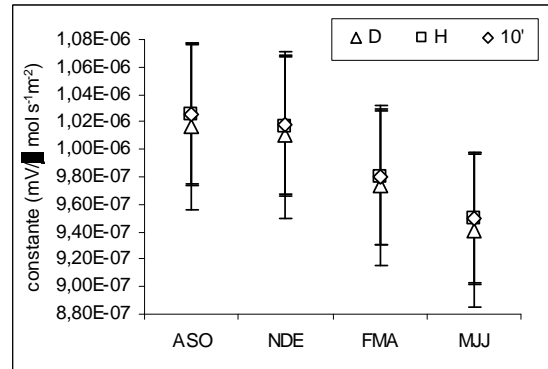


Fig. 8. Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, para cada una de las estaciones, calculadas en base diaria (Δ), horaria (□) y cada diez minutos (◇)

### 3.4. Análisis de las constantes en función de la altura solar

En la Figura 9 se presentan los valores de la constante en función de la altura solar (α).

Si se analizan los resultados obtenidos para la constante de calibración calculada empleando integrales cada diez minutos, se observa que hay un incremento en su valor con el aumento del ángulo de altura solar hasta los 50° y luego se estabiliza. El valor de la constante para ángulos menores a 20° difiere apreciablemente de la calculada para alturas solares mayores a 50°. Este comportamiento no se aprecia en los resultados obtenidos con las integrales horarias. El error absoluto de la pendiente es del orden 5% para los valores cada diez minutos y varía alrededor del 6% para los valores horarios.

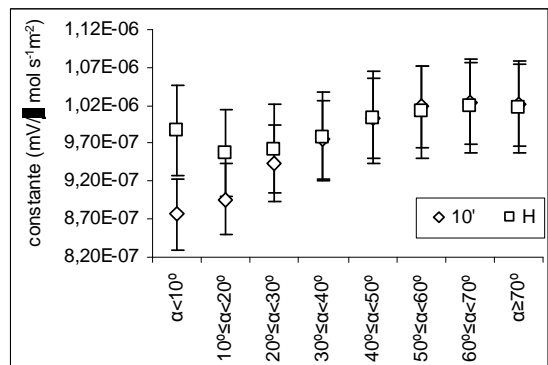


Fig. 9. Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar calculados con las integrales horarias (□) y cada diez minutos (◇)

### 3.5. Análisis de las constantes en función del índice de claridad y de la estación del año

Para cada categoría del índice de claridad se volvió a realizar un análisis por separado para los cuatro trimestres,

de manera de considerar posibles variaciones estacionales en la constante de cada una de esas categorías.

En las Figuras 10a) a 10c) se muestran los valores de la constante de calibración con sus errores para cada categoría de  $K_t$  en las cuatro estaciones. En ellas puede observarse que hay una disminución en el valor de la constante desde la primavera hacia el invierno (al igual que en la Figura 8), pero estas diferencias no son importantes si consideramos los errores de medición y estadístico. Al trabajar con las integrales diarias, algunas categorías quedan con muy pocos valores y el error de la pendiente crece de manera importante.

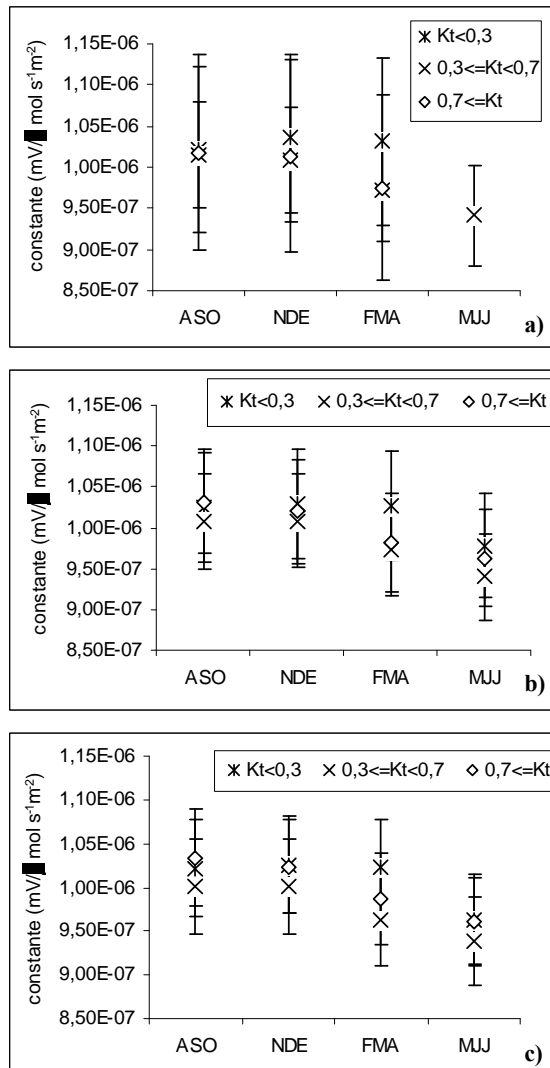


Fig. 10. Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función de la época del año calculados con las integrales a) diarias, b) horarias y c) cada diez minutos. Con \*, calculados con los días con cielo cubierto ( $K_t < 0.3$ ), con x, con los días parcialmente cubiertos ( $0.3 \leq K_t < 0.7$ ), y con  $\diamond$ , con los días despejados ( $K_t \geq 0.7$ )

### 3.6. Análisis de las constantes en función del índice de claridad y de la altura solar

En las figuras 11a) y b) se presentan los valores de la constante en función de la altura solar para las tres

categorías del índice de claridad, en base horaria y cada diez minutos respectivamente. Al trabajar con las integrales horarias, algunas categorías quedan con pocos valores y el error de la pendiente aumenta notablemente.

No se observan diferencias para las distintas condiciones de cielo, salvo en las constantes para ángulos menores a  $10^\circ$  calculadas con las integrales horarias. Bajo condiciones de cielo parcialmente nublado, en la Figura 11b) se aprecia una diferencia entre las constantes de calibración para ángulos solares inferiores a  $20^\circ$  y superiores a  $40^\circ$  que excede las cotas de error.

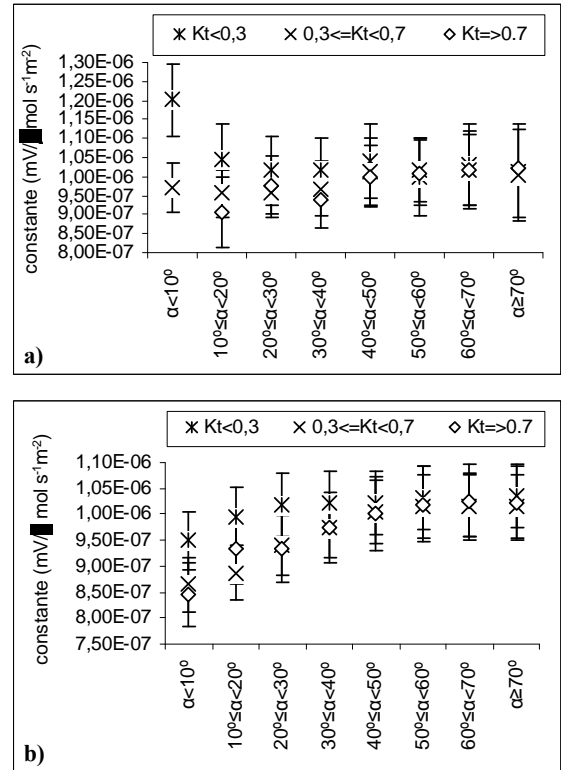


Fig. 11. Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar para las tres categorías del índice de claridad ( $K_t < 0.3$  con \*,  $0.3 \leq K_t < 0.7$  con x, y  $K_t \geq 0.7$  con  $\diamond$ ) calculados con las integrales a) diarias y b) cada diez minutos

### 3.7. Análisis de las constantes en función de la estación del año y de la altura solar

En las Figuras 12a) y b) se muestran las variaciones de la constante en función de la altura solar para las cuatro estaciones calculadas en base horaria y cada diez minutos respectivamente.

En la Figura b) puede verse que no hay cambios importantes de la constante entre estaciones, y que en el trimestre Agosto-Septiembre-Octubre es cuando se registra de manera más clara la diferencia en el valor de la constante para los ángulos menores a  $20^\circ$  y mayores a  $40^\circ$ ; mientras que en la Figura a) esta diferencia no se aprecia, pero si se ve que para alturas solares menores a  $10^\circ$  la constante difiere entre verano e invierno.

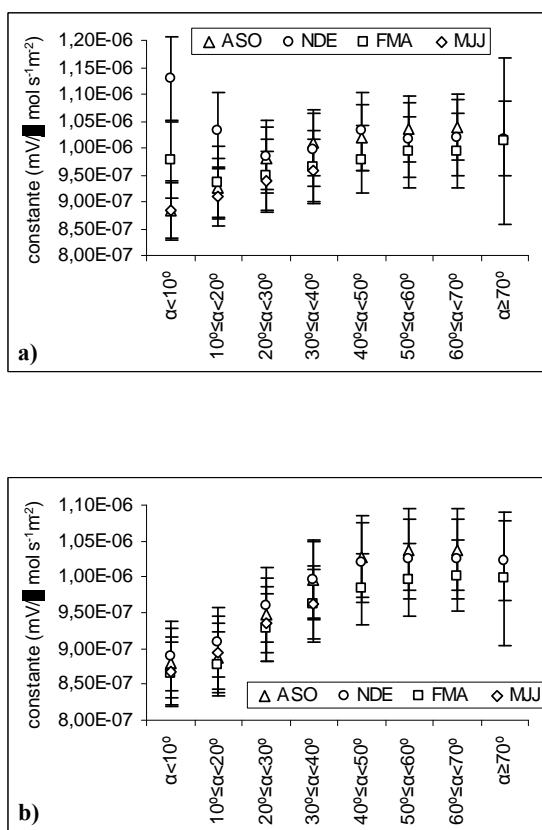


Fig. 12. Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar para las cuatro estaciones calculados con las integrales a) diarias y b) cada diez minutos

#### 4. CONCLUSIONES

De la serie de cálculos realizados para determinar la constante del sensor de CNEA, analizando el funcionamiento del equipo bajo diferentes condiciones de integración, cobertura de nubes, alturas solares, y épocas del año, puede concluirse que el funcionamiento de dicho sensor fue aceptable en todos los casos estudiados.

Las comparaciones de las integrales tomadas diariamente, cada hora y cada diez minutos entre el sensor PAR de CNEA y el radiómetro PAR Kipp & Zonen muestran una correlación excelente durante todo el período de 215 días que fuera analizado. La propia estabilidad del equipo Kipp & Zonen, cotejada mediante la comparación de las integrales diarias con un piranómetro CIMEL, permite equiparar el funcionamiento del sensor de CNEA con el medidor de PAR comercial.

Las constantes de correlación calculadas para datos diarios, horarios y cada diez minutos son iguales, dentro del margen de error del 5% que su determinación conlleva. En consecuencia, puede concluirse que el sensor de CNEA posee un desempeño comparable a uno comercial, motivo que lo constituye en una excelente alternativa de bajo costo

para cuantificar una variable que es relevante en diversos procesos biológicos.

El valor encontrado para la constante de calibración no presentó diferencias apreciables en función de las condiciones de cobertura de cielo ni de la época del año, lo que permite afirmar que la constante de calibración presenta condiciones de estabilidad deseables para un sensor de medición. La única diferencia se encontró en función de la altura solar (sólo con las integrales cada 10 minutos), pero separando según la época del año y las condiciones de nubosidad, esta diferencia se observa sólo en el trimestre Agosto-Septiembre-Octubre y bajo condiciones de cielo parcialmente cubierto. No obstante, debido a que para valores bajos de altura solar la energía que llega al plano horizontal es pequeña, el error en la constante no determina variaciones apreciables para las integrales horarias y diarias. Para corroborarlo debería realizarse un estudio adicional más detallado de la respuesta del sensor en función del ángulo de incidencia.

Debe tenerse en cuenta que debido a que el sensor se encuentra algunos milímetros más abajo que el vidrio cobertor, es probable que pueda tener alguna diferencia mayor para ángulos rasantes, por lo cual se prevé para el futuro remediar esto. Además, está en estudio el uso de otros filtros comerciales y la posibilidad de desarrollar en la CNEA la construcción de dichos filtros.

#### AGRADECIMIENTO

Este trabajo está parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través de los Proyecto PICT 2005 N° 38034 y PICT 2006 N° 586.

#### REFERENCIAS

- Bolzi C.G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 11.01- 11.02
- Bolzi C.G., Martínez Bogado M. G., Tamasi M. J. L., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. En *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2008*, organizado por la Asociación Argentina de Luminotecnia, Rosario, Santa Fe, Argentina, Tomo I pp. III-38 a III-45.
- Larcher W. (1977). *Ecofisiología vegetal*. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Magrin G., Díaz R., Rebella C., Del Santo C. y Rodríguez R. (1991). Simulación del crecimiento y desarrollo de trigo en Argentina y la necesidad de información meteorológica de entrada. *Anales del CONGREGMET IV*, pp. 49-50.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2005). Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9, 11.01-11.04.