

# CALIBRACIÓN DE UN RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SEGMENTADA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

**Raúl Righini, Rosana Aristegui, Santiago Fioretti**

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-  
Universidad Nacional de Luján (UNLu)  
Tel. 02323-440241–e-mail: raulrighini@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** La calibración de radiómetros en general (y de fotovoltaicos en particular) debe ser revisada en aras de lograr que sea más representativa de las condiciones reales de funcionamiento del instrumento en cuestión. Se aborda en este trabajo la calibración segmentada, usándose tres constantes de calibración para un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA. Las constantes son particulares de bandas específicas de irradiancia. La calibración aquí ensayada usando varios meses de datos para ello y dos meses de mediciones para el testeo de la misma, presenta una mejora respecto al desempeño del radiómetro del orden del 6%.

**Palabra clave:** Calibración, radiómetro solar, fotovoltaico, segmentación en irradiancia.

## INTRODUCCIÓN

La calibración de un radiómetro es una actividad pautada, en líneas generales, por algunas de las normas específicas internacionalmente adoptadas como estándares de calibración. Podemos citar como ejemplo las normas ISO 9847 o ISO 9846. Ellas apuntan, en primera instancia, a la obtención de la sensibilidad del instrumento, sensibilidad que permite transformar su variable de salida (habitualmente un voltaje) en irradiancia en el rango electromagnético en que la radiación solar incidente en la superficie terrestre se distribuye.

Dicho de otra forma, la sensibilidad de un determinado radiómetro es  $\mu$ , donde la relación entre la diferencia de voltaje ( $\Delta V$ ) entregado por el radiómetro y la irradiancia ( $\Phi$ ) que se pretende medir es:

$$\Phi = \frac{\Delta V}{\mu} \quad (1)$$

Las unidades de la sensibilidad  $\mu$  habitualmente están dadas en  $\frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$

La norma ISO 9847 especifica que, en relación con la precisión y exactitud de la determinación de las sensibilidades de calibración de un radiómetro calibrado en exteriores contra uno de referencia, debe ser tal que el desvío estándar sea menor al 0,5% (cerca del mediodía). Esta condición resulta restrictiva en condiciones de cobertura nubosa variable. También la norma restringe las mediciones durante días con cielos cubiertos a condiciones en que la media horaria de irradiación solar global sea mayor a 100 W/m<sup>2</sup>. Este tipo de indicaciones va, en opinión de los autores, decantando las mediciones a aquellas que fueron realizadas bajo condiciones de cielos despejados con poca variabilidad horaria.

Por otra parte, el tratamiento de los datos obtenidos requiere descartar a aquellos que impliquen un desvío excesivo de la sensibilidad individual que determinan, respecto al valor promedio global de la sensibilidad.

Esta manera de proceder presenta ventajas, fundamentalmente en lo que hace al establecimiento de una normativa general del procedimiento de calibración, a la estandarización de las condiciones en que los datos de irradiación son obtenidos y a la evaluación de las incertezas. Su objetivo es doble: por un lado, determinar el procedimiento y, por otro, pautar la forma de obtener una **única** sensibilidad (o constante de calibración) que permita la conversión adecuada del voltaje en irradiancia.

No obstante, hay ciertas desventajas inherentes a esta manera de proceder que pueden sintetizarse en lo siguiente: la calibración bajo ciertas condiciones sumamente favorables y el descarte de datos relacionados con desvíos elevados, condicionan la sensibilidad obtenida a ser representativa de sólo un grupo particular de situaciones de irradiancia.

En efecto, calibrar con el Sol en ángulos cenitales relativamente menores, bajo condiciones de poca variabilidad de irradiancia, descartando datos que presenten mucha desviación, determina que la calibración del radiómetro puede no ser representativa de todas las condiciones en las que el mismo se empleará. Sin embargo, el radiómetro se usará, generalmente, para medir bajo distintas coberturas de cielo: despejado o cubierto total o parcialmente, con ángulos cenitales altos y pequeños, bajo temperaturas cambiantes, por citar solamente algunas de las variables posibles.

El presente artículo pretende presentar una vía posible para adaptar el procedimiento de calibración con vistas a considerar de manera más efectiva las condiciones de uso de un radiómetro fotovoltaico, posibilitando una prestación mejor.

Para ello, la primera modificación básica a analizar es tratar de usar, en vez de una sola sensibilidad para la calibración, varias de ellas. Cada una de estas sensibilidades se aplicará en un rango determinado de irradiancias (o valores de voltaje) del instrumental. De esta manera la selectividad indicada por la normativa para las condiciones de cielo bajo las cuales se calibra será reemplazada por una selectividad en la elección de la constante de calibración, representativa de las condiciones de irradiancia bajo las cuales se emplea el instrumento.

Esta propuesta para el procedimiento de calibración forma parte de una primera aproximación en el empleo de inteligencia artificial para la evaluación de la irradiancia solar, usando múltiples variables de entrada (voltaje del radiómetro como fundamental, pero también aquellas relacionadas, por ejemplo, con la posición del Sol) (James et al., 2013; Hastie et al., 2009; Zimmerman et al., 2018, Rooster 2005). Abordar una calibración, usando distintos juegos de constantes según el rango de irradiancia, constituye un primer paso en ese sentido.

## **MATERIALES Y MÉTODO**

Se calibró un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA N° G2021 04 (Bolzi et al. 1999; Bolzi et al. 2002), usando como referencia un radiómetro piranométrico CMP21, N° 149433, de la firma Kipp&Zonen. Ambos equipos se encuentran midiendo simultáneamente desde el 14 de diciembre de 2022 en la estación Luján de medición de radiación solar que el GERSolar administra en su predio de la UNLu (latitud= -34,58815; longitud= -59,06277). La salida de voltaje de ambos equipos es medida una vez por segundo, y los promedios minutales son almacenados en una tarjeta SD y simultáneamente grabados en una hoja de cálculo de Google Sheet, pudiéndoselos visualizar en tiempo real desde cualquier sitio que posea conexión a internet. El adquisidor de datos es el adquisidor DatIn, desarrollado por el GERSolar, de excelentes prestaciones.

Para realizar las calibraciones del radiómetro fotovoltaico y evaluar las diferencias entre sus mediciones y las del CMP21, se emplearon datos comprendidos en el período que se extiende entre el 14 de diciembre de 2022 y el 31 de marzo de 2023. Para testear los resultados de las calibraciones se usaron mediciones de ambos equipos realizadas entre el 1 de abril de 2023 y el 8 de junio de 2023. Cabe resaltar

que ninguno de los datos usados para testear las calibraciones fue empleado para calibrar. De esta manera la evaluación de desempeño, en el presente artículo, se realizó bajo la mecánica habitual de uso de los radiómetros calibrados: se los calibra y luego se mide con ellos. Evaluar de esta forma resulta, a nuestro juicio, más adecuada que otra mecánica usual, consistente en evaluar resultados calibrando con parte de los datos disponibles, dejando un porcentaje de ellos para el testeado de los modelos y luego promediando los resultados de múltiples selecciones de los conjuntos de datos tomados al azar. Proceder así conlleva el riesgo de apartarse del mecanismo habitual de calibración, por un lado. Por el otro, realizar la evaluación con una serie de datos que no hayan participado nunca del proceso de calibración y, además, pertenezcan a un período temporal distinto de aquellos usados para la determinación de la (o las) sensibilidad (sensibilidades) asegura un testeado de los resultados con un radiómetro bajo sus condiciones habituales de uso.

En principio, se analizaron los cocientes entre los voltajes entregados por ambos radiómetros: el piranométrico (CMP21) y el fotovoltaico (CNEA).

$$C_{pir/foto} = \frac{\text{Voltaje CMP21}}{\text{Voltaje fotovoltaico}} \quad (2)$$

Descartando valores extremos, representativos de situaciones correspondientes a muy bajos niveles de irradiancia solar, ese cociente varía entre 37 y 1,78. Los valores más altos del cociente corresponden a valores de irradiancia que son, en general, menores a 20 W. Aquí es esperable ese tipo de comportamiento, pues la respuesta de ambos radiómetros es significativamente diferente para irradiancias bajas. Por lo que, consideramos solamente aquellos valores del cociente que se correspondan a valores de irradiancia superiores a 50 W. Ese valor de corte implica descartar valores asociados a alturas solares menores a los 7° (para los cuales la irradiancia solar es baja), o a situaciones de muy baja irradiancia. Dado que los errores relativos (que surgen de la comparación entre lo medido por el piranómetro de referencia y el fotovoltaico) son elevados y representan un aporte de energía menor, resulta conveniente descartarlos, pues de ser considerados, su peso en la determinación de la constante asociada a bajas irradiancias sería elevado y la ganancia por considerarlos, pequeña.

Considerando ese universo para los datos analizados, encontramos que el cociente definido anteriormente se encuentra en el intervalo: (2,95; 1,78). Los valores más bajos del cociente se corresponden con valores altos de irradiancia (alrededor de 1000 W). El valor promedio del cociente es de 2,17 (promediando sobre todos los datos).

Es decir que los desvíos máximos del cociente respecto al valor promedio general son de aproximadamente (para sus valores mínimos y máximos) 17,8 % y 36,22%, respectivamente.

Este desvío, por lo tanto, no puede atribuirse a errores en la medición del voltaje del adquisidor de datos, o los errores asociados a los propios radiómetros. Da cuenta, en cambio, de un funcionamiento diferenciado del radiómetro fotovoltaico (tomando como parámetro de referencia el radiómetro piranométrico CMP21) en función de la irradiancia incidente sobre el mismo.

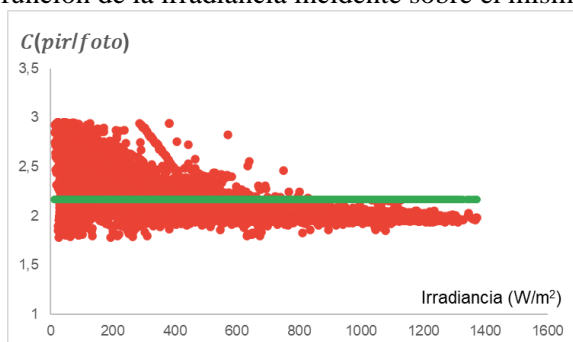


Figura 1: Cociente entre voltajes de los radiómetros CMP21 y Fotovoltaico, en rojo. En verde se muestra el valor medio de la serie de datos

Es por eso que la alternativa de realizar una calibración segmentada, determinando sensibilidades diferenciadas para diferentes rangos de voltajes de salida del fotovoltaico de CNEA, se revela como una solución para mejorar la calibración y, por ende, el desempeño del radiómetro.

## RESULTADOS

Para proceder a comparar los métodos, se realizó en primer lugar una calibración considerando una única sensibilidad para todo el conjunto de valores. La sensibilidad determinada por este procedimiento (la que denominaremos  $\mu_{estandar}$ )

$$\mu_{estandar} = 17,2 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{w}{m^2}} \quad (3)$$

determinada con un error del 1,5%.

En la figura 2 se muestran los datos simultáneos: por un lado el voltaje promedio minatural medido para el radiómetro fotovoltaico de CNEA ; por el otro la irradiancia promedio minatural medida por el CMP21.

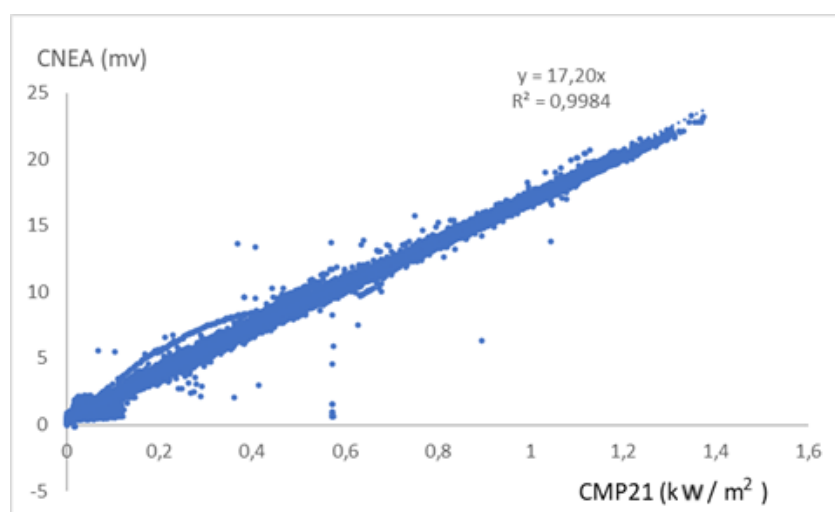


Figura 2: Calibración usual del radiómetro fotovoltaico de CNEA frente al CMP21

El desvío medio de los valores de irradiancia (definido como el promedio de la diferencia absoluta porcentual entre valores medidos por el CMP 21 y el sensor fotovoltaico) determinados para el fotovoltaico mediante la constante de calibración obtenida, fue de 21,7%, mientras que el sesgo promedio (la diferencia porcentual entre valores medidos por el CMP21 y el sensor fotovoltaico) fue de -20,8%. Esto se calculó para los propios datos usados para la calibración (con todos, sin hacer la selección que el procedimiento de calibración pauta). Mientras que el mismo desvío, calculado ahora con los datos usados para testear (desde el 1 de abril hasta el 8 de junio) fue de 26,8% y el sesgo -26,3%. Es posible que estos números parezcan demasiado altos, pero hay que considerar que los desvíos mayores ocurren en condiciones de muy baja irradiancia. En esas condiciones una diferencia entre la medición del CMP21 y el radiómetro fotovoltaico puede, porcentualmente, ser muy grande. Dado que los desvíos presentados son promedios sobre todo los valores, su peso en él es elevado. No obstante, su aporte energético es muy bajo, aportando poco a las horas de mayor irradiancia y a la radiación diaria.

Tomando esos valores como parámetros de referencia para la comparación, se procedió a realizar una calibración segmentada, determinando tres bandas de irradiancia para obtener tres constantes de calibración para el radiómetro fotovoltaico.

Las bandas de irradiancia (seleccionadas por una inspección visual de los datos) fueron:

Banda 1: (0 W/m<sup>2</sup>; 400 W/m<sup>2</sup> )  
 Banda 2: (400 W/m<sup>2</sup>; 610 W/m<sup>2</sup>)  
 Banda 3: (610 W/m<sup>2</sup>; )

Cada uno de esos valores de irradiancia se corresponde con un voltaje específico del radiómetro fotovoltaico, por lo que también las bandas pueden ser dadas en función del voltaje del fotovoltaico de CNEA. Los valores elegidos como límites para la segmentación se seleccionaron arbitrariamente. Se trata de una decisión tomada por inspección visual del conjunto de datos considerados para la calibración. Para fundamentar esos valores elegidos de manera matemática, es necesario realizar un procedimiento de cálculo que estamos implementando para ser presentado en un trabajo futuro.

Realizando, entonces, tres calibraciones (una por banda) se obtuvieron las siguientes sensibilidades:

$$\mu \text{ Banda 1} = 18,36 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\mu \text{ Banda 2} = 17,65 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\mu \text{ Banda 3} = 16,99 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Todas las constantes fueron determinadas con un error del 1,5%.

La figura N° 3 muestra los gráficos de las calibraciones segmentadas por bandas de irradiancia. La figura N° 4 el gráfico comparativo entre las irradiancias medidas con el CMP21 y las calculadas con el radiómetro fotovoltaico, aplicando la calibración segmentada a los datos de testeo.

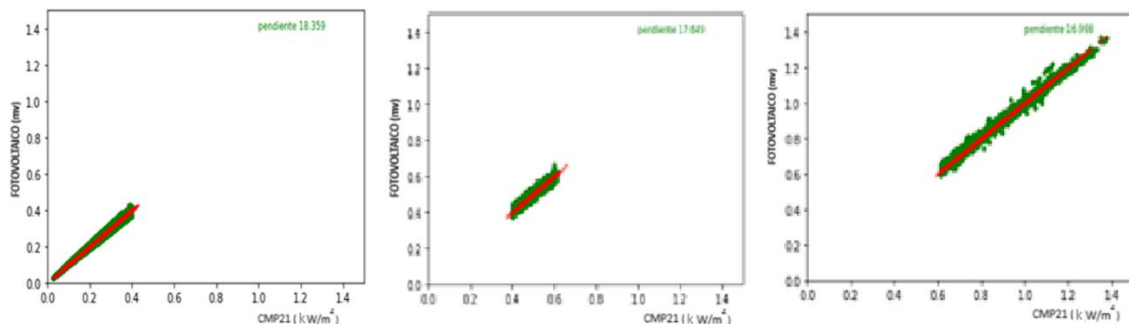


Figura 3: Gráficos correspondientes a las calibraciones en las tres bandas seleccionadas.

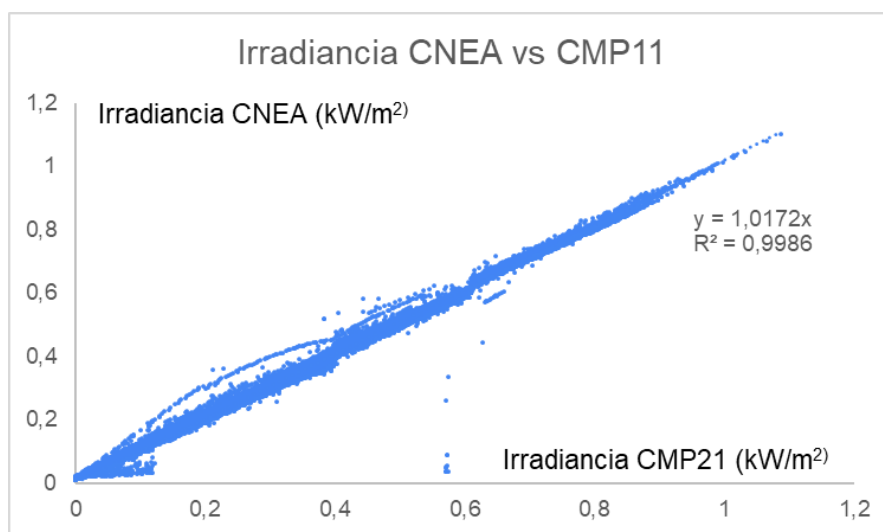


Figura 4: Irradiancia del radiómetro fotovoltaico calibrado segmentadamente frente al CMP21

La comparación entre el desempeño de la calibración usual del fotovoltaico con sólo una constante de calibración y la calibración segmentada, revela un error menor para esta última. La comparación se realizó, con los datos reservados para testear.

En efecto, usando esos datos, mientras que el error medio para la energía calculada para el fotovoltaico con la calibración usual, tal como se mostró anteriormente, fue del 26,8% y su sesgo -26,3%, mientras que, los errores medio y el sesgo, para la calibración segmentada, fueron 20,7% y -19,6 %, respectivamente.

Estas diferencias son significativas y justifican, a nuestro juicio, el procedimiento llevado adelante.

Se repitió el procedimiento y las comparaciones respectivas, con la estación que el GERSolar opera en Armstrong. Los datos analizados corresponden a mediciones simultáneas de dos radiómetros: un CMP11 y un fotovoltaico de CNEA, bajos las mismas condiciones de almacenamiento de datos que se dieron en la estación Luján. Se aplicaron allí también tres constantes de calibración para comparar el desempeño del radiómetro fotovoltaico calibrado con ellas frente a una calibración usual. Se calibró con datos minutales entre el 31 de marzo de 2023 y el 30 de abril de 2023. Se testeó con datos tomados entre el 1 de mayo y el 4 de julio de 2023. Se repitió aquí un comportamiento similar del radiómetro fotovoltaico comparado con el piranométrico. La calibración segmentada mejoró un 2% el error promedio y el sesgo con los datos de la propia calibración, pero no aportó diferencias significativas con la calibración usual cuando se analizaron los datos de testeó. No podemos determinar, hasta el momento, las causas de este comportamiento. No queda claro aún con el volumen de datos que se analizaron si esto se debe a alguna situación particular relacionado con la radiación solar en ese sitio en el período de testeó seleccionado, o a alguna característica **propia** del radiómetro que se encontraba midiendo simultáneamente con el CMP11. Se ve para el cociente entre los voltajes de los radiómetros CMP21 y Fotovoltaico instalados en Armstrong, un comportamiento similar al mostrado en la figura N°2 para la estación Luján, pero, según se explicó, no hay una mejora del comportamiento del fotovoltaico mediante su calibración segmentada. Un seguimiento durante un período más prolongado ayudará a determinar la causa de estas diferencias. De igual manera, la determinación de los límites de la segmentación mediante un proceso de cálculo no arbitrario permitirá entender mejor las condiciones requeridas para su aplicabilidad.

## CONCLUSIONES

La respuesta (en voltaje) a la irradiancia de un sensor solarimétrico fotovoltaico como el construido por CNEA presenta una variabilidad tal que permite inferir un funcionamiento diferenciado en función de dicha irradiancia.

En tal sentido, una calibración segmentada en irradiancia se presenta como una alternativa válida para mejorar la prestación de un radiómetro fotovoltaico y constituye un primer paso en el empleo del aprendizaje de máquina en el cálculo de la irradiancia brindada por un radiómetro en función de múltiples variables. En el ensayo realizado, reservando datos que no se usaron para la calibración para el testeó del procedimiento, se encontró una disminución significativa (aproximadamente el 6%) del error medio en el desvío (respecto al radiómetro CMP21 tomado como referencia) comparada con una calibración usual que emplea sólo una constante con los equipos presentes en la estación Luján. La mejora fue menor con datos provenientes de un sensor fotovoltaico y uno piranométrico en la estación Armstrong.

El uso de varias constantes de calibración no supone ninguna complicación grave en el cálculo de la irradiancia del sensor ni en el tratamiento de los datos, habida cuenta de las capacidades computacionales existentes hoy día, de la facilidad de programación de los adquirentes de datos o de la existencia de microcontroladores programables de forma sencilla, para realizar los cálculos con tres constantes en lugar de una.

El precio a pagar en ese sentido, es muy bajo frente a la mejora en las capacidades de medición del radiómetro en cuestión.

No puede obviarse, como conclusión más general, la necesidad, a nuestro juicio, de hacer una revisión crítica de los procedimientos de calibración recomendados, habida cuenta del avance tecnológico presente, las facilidades computacionales actuales y la necesidad de abordar los nuevos mecanismos de aprendizaje de máquina aplicados al instrumental destinado a medir la radiación solar.

## REFERENCIAS

- Bolzi C.G., Durán J.C., Dursi O., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (1999) Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA. AVERMA 1 pág. 4.8.
- 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.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: springer.
- Norma ISO 9846 (1992). Solar Energy: Calibration of a pyranometer using a pyr heliometer.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning (Vol. 112, p. 18). New York: springer.
- Norma ISO 9847 (1992). Solar Energy: Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.
- Rooster R. (2005) High performance calibrations under cloudy sky conditions. Developments in solar engineering, Vol 56, N° 3. Pp 211-223.
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P., Gu, J., Haurlyuk, A., Robinson, E. S., ... & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. Atmospheric Measurement Techniques, 11(1), 291-313.

## CALIBRATION OF A SEGMENTED PHOTOVOLTAIC RADIOMETER ACCORDING TO IRRADIANCE

**ABSTRACT:** The calibration of radiometers in general (and of photovoltaics in particular) should be reviewed in order to make it more representative of the actual operating conditions of the instrument in question. Segmented calibration is addressed in this work, using three calibration constants for a photovoltaic radiometer manufactured by CNEA. The constants are specific to specific irradiance bands. The calibration tested here using several months of data for it and two months of measurements for testing it, presents an improvement with respect to the performance of the radiometer of the order of 6%.

**Keywords:** Calibration, solar radiometer, photovoltaic, irradiance segmentation