

## Optimización de la calidad de las observaciones actinométricas mediante el ajuste de los factores de conversión



### Optimization of the quality of actinometric observations by adjusting the conversion factors <https://eqrcode.co/a/DksyX0>

 Ailin Agüero Moronta\*,  René Estevan Arredondo,  Yarisbel Marialis Morera Isla

Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba

**RESUMEN:** Se ha desarrollado una nueva metodología la cual permite reprocesar las observaciones actinométricas, una vez llevado a cabo un proceso de postcalibración de las estaciones actinométricas en funcionamiento. Esta metodología permitirá elevar considerablemente la calidad de las observaciones actinométricas, por lo que se han propuesto dos niveles de calidad para este tipo de datos. El primer nivel de calidad corresponderá a los datos actinométricos procesados con los factores de calibración iniciales. Al segundo nivel de calidad corresponderán los datos que hayan sido reprocesados una vez realizada la postcalibración a las estaciones de trabajo. Se propone igualmente, el establecimiento de un ciclo anual de calibraciones, el cual debe concluir con la postcalibración de las estaciones, lo cual redundará en el incremento de la calidad de los datos. Para esta investigación se empleó la metadata de la Estación Actinométrica de Camagüey correspondiente al período de 1981 hasta el 2013. Se determinaron las variaciones de los valores de las irradiancias medidas para dos períodos de tiempo, uno considerado corto, en el cual se tomaron en cuenta todos los cambios de factores y otro considerado largo basado en los criterios de tolerancia de la variación de los factores. Se demostró la necesidad de realizar un estudio sobre la validez de los valores de tolerancia hasta ahora empleados en la red de estaciones.

**Palabras claves:** observaciones actinométricas, postcalibración, factores de conversión.

**ABSTRACT:** A new methodology has been developed, which allow to reprocess actinometric observations after a postcalibration process have been conducted to the operative actinometric stations. This methodology will increase considerably the quality of actinometric observations, therefore have proposed two quality levels for this type of data. The first data quality level corresponds to actinometric observations processed with the initial calibration factors. The second data quality level correspond to reprocessed data once the postcalibration process has been conducted to the actinometric stations. It also proposes the establishment of an annual cycle of calibrations, which should include the postcalibration procedure, which will result in increasing the quality of the data. For this research we used the metadata Actinometric Camaguey Station for the period from January 1, 1981 to present. Were determined variations in the irradiance values measures for two time periods, one considered as short, which took into account all the changes in the calibration factors and other considered as the long period, taking into account the criteria based on variation of tolerance factor. It showed the need for a study on the validity of the tolerance values hitherto used in the network of stations.

**Keywords:** actinometric observations, postcalibration, conversion factors.

### INTRODUCCIÓN

Las mediciones de radiación solar constituyen un importante aporte a los estudios atmosféricos dirigidos, fundamentalmente, a la determinación del balance energético del sistema Tierra-Atmósfera-Océano. En el mundo, diferentes países investigan sobre este importante tema, muestra de ello es la presentación de una metodología operativa para la estimación de la irradiancia solar global horizontal y directa en la geografía española a partir de imágenes de alta resolución del canal visible de la familia de satélites METEOSAT

primera generación; la cual permite la generación de series temporales de irradiancia solar horaria durante un periodo de 12 años, desde 1994 a 2005 (Polo, 2010). En Argentina, evaluaron 12 modelos de descomposición utilizados para estimar la radiación solar directa horaria. Los modelos tienen como variable de entrada sólo la radiación solar global, incluyendo algunos de ellos factores geométricos como la altura solar o la aeromasa. A su vez los distintos modelos se compararon entre sí, cuantificando su capacidad predictiva relativa mediante un conjunto de estimadores estadísticos (Raichijk & Taddei, 2012).

\*Autor para correspondencia: Ailin Agüero Moronta. E-mail: [ailinaguero86@gmail.com](mailto:ailinaguero86@gmail.com)

Recibido: 29/06/2020

Aceptado: 16/02/2021



Figura 1. Comportamiento de la cantidad de Calibraciones por año para la EAC

Desde finales de la década de los 60 en Cuba, se realizan mediciones de radiación solar, empleando para ello estaciones actinométricas manuales de superficie de fabricación rusa del tipo Yanishevski. Actualmente este instrumental se encuentra ubicado en las estaciones meteorológicas de Casablanca, Jovellanos, Santa Fe, Topes de Collantes y Camagüey. Esta última ha proporcionado más de 40 años de datos, los cuales fueron recuperados en gran medida mediante un proyecto territorial ejecutado por el Grupo de Óptica Atmosférica de Camagüey (GOAC) (Antuña *et al.*, 2010) y completada durante la ejecución de un proyecto nacional (Estevan *et al.*, 2012). Este proceso de recuperación consistió en la conversión a formato digital de las observaciones registradas en los libros originales de mediciones, con el objetivo de su empleo posterior en investigaciones científicas y estudios climáticos.

Según las normas establecidas para la explotación de las estaciones actinométricas del tipo Yanishevski, debe realizarse una calibración semestral pero, debido a la variabilidad de las condiciones del tiempo, entre otros factores, es prácticamente imposible realizarlas con tal periodicidad. La calibración de una estación consiste en la comparación de un sensor de trabajo con un patrón, por medio de lecturas simultáneas de ambos equipos, con el objetivo de determinar el factor de conversión del instrumento de trabajo. En el Centro Meteorológico Provincial de Camagüey se cuenta con los patrones requeridos y la experiencia necesaria para la realización de estas calibraciones.

Debido al largo período de explotación a que han sido sometidos los sensores empleados en las estaciones actinométricas existentes en Cuba, la sensibilidad de estos instrumentos se ha visto afectada. La utilización, por tanto, de los factores de conversión durante el período comprendido entre calibraciones, sin que se realicen ajustes por el deterioro de los mismos, ejerce una influencia negativa en la calidad de los datos resultantes. De lo expresado anteriormente surge la siguiente interrogante: ¿cómo cuantificar la variación que sufren los factores de conversión entre calibracio-

nes y su influencia en la calidad del dato resultante? El objetivo propuesto para este estudio consiste en desarrollar una metodología para efectuar el ajuste de dichos factores mediante métodos numéricos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se empleó la metadata correspondiente a la Estación Actinométrica Camagüey (EAC). La misma está constituida por la serie instrumental, es decir, los períodos de calibraciones realizadas a la EAC con el listado de sensores que han acompañado cada periodo de trabajo con sus respectivos Factores de Conversión (FC); además contiene información sobre las características físicas y constructivas de los sensores, o sea, los certificados que acompañan a cada sensor e instrumento. Estos certificados contienen información diversa, como son: el tipo de sensor, número de serie, modelo, tipo de galvanómetro y su número de serie; además de los valores de resistencia y otros.

La información contenida en la metadata es la que permite realizar el procesamiento, ahora automatizado, de las observaciones actinométricas. Las calibraciones abarcan desde abril de 1969 hasta el 2013, pero las que se emplearon en este estudio cubren desde enero de 1981 hasta el 2013, ya que en este período ha sido verificada exhaustivamente la calidad de los datos y la metadata en sí, para su empleo en el establecimiento de la climatología en la Estación Camagüey (Estevan *et al.*, 2012).

La figura 1, muestra las calibraciones que se realizaron durante todo el período de análisis. Los años que no aparecen en la figura están dentro del período donde no se realizaron calibraciones. En el caso de los años desde 1991 a 1993, el país se encontraba inmerso en los momentos más intensos del llamado período especial, época en la cual la estación funcionó de forma intermitente.

Por las razones antes expuestas y otras de carácter logístico, no se realizaron las calibraciones correspondientes a la estación, por lo que esta situación afec-

tó seriamente el desempeño del trabajo actinométrico prácticamente en todo el país y en particular en la EAC. En el caso de los años 1997 y 1998 se realizaron inspecciones por parte de los compañeros encargados de esta actividad pero no quedó constancia alguna de que se realizaran calibraciones a los sensores. Durante el periodo 2003 al 2005 existe poca información sobre el control y uso de la estación.

Para la investigación que se ha llevado a cabo se han despreciado los cambios de factores por instalación de nuevos sensores y se ha trabajado solamente con los factores que han cambiado, pero que proceden de los mismos pares sensor-galvanómetro en el transcurso del tiempo.

Los cambios de factores se efectúan atendiendo a la tolerancia de los instrumentos de trabajo a que hace referencia el *Manual de Procedimiento de Observaciones Actinométricas* pág. 69 (Acea, 2010). Por tanto, si en dos calibraciones de control consecutivas el nuevo factor calculado se diferencia del vigente en más del 3% para el caso del actinómetro se debe proceder a cambiar el FC. Para el caso del piranómetro la tolerancia es de un 5% mientras que para el balanzómetro ésta alcanza hasta el 10%.

Partiendo de lo expresado en el párrafo anterior, el análisis de los cambios de factor se realizará en dos partes. En la primera no se tendrán en cuenta los rangos de tolerancia de cada sensor, por lo que se analizarán todos los casos en los que haya cambiado el FC, independientemente de la magnitud del cambio. En el segundo análisis se tendrán en cuenta los rangos de tolerancia establecidos para cada sensor. De esta forma se busca verificar que los rangos establecidos por la metodología original (soviética), se adecúan realmente a las condiciones de Cuba.

En el periodo comprendido desde el año 1981 hasta 2013, se han realizado un total de 38 calibraciones. En la **Tabla 1** se representan todas las calibraciones realizadas a los balanzómetros empleados en la EAC y estos no fueron sustituidos. Durante el periodo estudiado se han utilizado solamente un total de 4 balanzómetros y 1 galvanómetro acoplado a estos.

Por su parte en la **Tabla 2** muestra los periodos en los que se hicieron calibraciones al actinómetro y al piranómetro, y permanecieron los mismos instrumentos. Estos dos instrumentos aparecen juntos en esta tabla porque ambos están unidos al mismo galvanómetro como ha sido abordado anteriormente. Las etapas intermedias que no aparecen en la **Tabla 2** han sido irregulares en cuanto al empleo de sensores, por lo que estos no han sido incluidos, ya que al cambiar un sensor hay que someterlo a calibración y puede cambiar el FC. En total, durante el periodo objeto de análisis se han empleado: 4 actinómetros, 8 piranómetros y 5 galvanómetros acoplados a estos.

Al analizar las tablas anteriores se deduce que los sensores más estables en el tiempo han sido el actinómetro y el balanzómetro. Partiendo del criterio ex-

**Tabla 1.** Periodos en los que se realizaron calibraciones al Balanzómetro sin cambios del sensor

Fecha inicial	Fecha final	Cantidades	
		Meses	Calibraciones
01/12/1980	10/08/1981	9	2
11/08/0981	24/11/1984	40	7
25/11/1984	01/07/1988	78	5
02/07/1988	2013	299	24

**Tabla 2.** Periodos en los que se realizaron calibraciones al Actinómetro y al Piranómetro sin cambio de sensores

Fecha inicial	Fecha final	Cantidades	
		Meses	Calibraciones
01/12/1980	07/02/1983	26	5
08/02/1983	05/07/1983	5	2
06/07/1983	01/07/1988	60	7
02/07/1988	18/11/1988	5	1
19/11/1988	28/09/1989	10	1
29/09/1989	07/11/1990	13	2
08/11/1990	01/03/1999	100	3
02/03/1999	11/02/2000	11	1
12/02/2000	02/07/2002	29	2
03/07/2002	31/05/2006	47	2
01/06/2006	2013	84	12

puesto para el primer tipo de análisis, se encontró que el FC del actinómetro cambió 26 veces en total, durante todo el periodo, mientras que en el caso del piranómetro este lo hizo un total de 16 y en cuanto al balanzómetro, este varió 18 veces en total.

Con el objetivo de poder cuantificar la influencia de los cambios de los FC sobre los resultados de las mediciones actinométricas, es preciso reprocesar nuevamente las observaciones actinométricas dentro del periodo en el que se produjo el cambio en los FC. Para esto es necesario determinar la variación que ha experimentado el FC en el tiempo durante el periodo específico. El procedimiento empleado con este fin ha sido la interpolación lineal a partir de la determinación de la pendiente entre las dos calibraciones, inicial y final (**Ecuación 1**).

$$FC_i = \left( \frac{FC_{final} - FC_{inicial}}{día_{final} - día_{inicial}} * día \right) + FC_{inicial} \quad (1)$$

Donde:

FC<sub>i</sub> = factor de conversión interpolado

día<sub>inicial</sub> = fecha de la calibración inicial

día<sub>final</sub> = fecha de la calibración final

FC<sub>inicial</sub> = factor de conversión inicial

FC<sub>final</sub> = factor de conversión final

día = fecha específica para la que se quiere hallar el FC interpolado

Una vez determinados mediante interpolación los FC para cada día entre la fecha de la calibración inicial y la final, se procedió a recalculer la totalidad

de las observaciones actinométricas involucradas en el período. Con la nueva versión de datos post procesados se procedió a calcular las diferencias porcentuales (Ecuación 2) y el Porcentaje de las Diferencias Medias Absolutas (PDMA, Ecuación 3), para las irradiancias global (Q), directa (S) y difusa (D) además de para el balance de onda corta (Bc).

$$Dif_p = \left( \frac{l_{post} - l_{pre}}{l_{pre}} \right) * 100 \quad (2)$$

$$PDMA = mod \left[ \frac{(l_{post} - l_{pre})}{\left( \frac{l_{post} + l_{pre}}{2} \right)} \right] * 100 \quad (3)$$

Los datos de la calibración inicial y la calibración final (postcalibración) pertenecen a la suma diaria del flujo instantáneo, calculados según el procesamiento de la AM-1, expresados en MJ/m<sup>2</sup>.

Este procedimiento antes descrito se realizó para ambos análisis, o sea, para aquellos casos en los que cambió el factor independientemente de la magnitud de la variación y para los que tienen en cuenta la tolerancia específica de cada sensor.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 que se muestra a continuación contiene el mínimo y máximo de días que permaneció un FC para cada instrumento, así como, el valor medio de días por sensor. De este análisis se puede concluir que el menor tiempo de permanencia de los FC por sensores se encuentra en torno al mes. En cuanto al mayor tiempo de permanencia, tanto el Actinómetro como el Balanzómetro alcanzan prácticamente la misma cantidad de días, lo mismo ocurre para la cantidad de días promedios. Es significativo que en el caso del Piranómetro, excepto en la cantidad de días mínimos, en el resto las magnitudes estas son siempre prácticamente la mitad del período del resto de los sensores. Este análisis debe ser tenido en cuenta a la hora de la programación de las calibraciones ya que evidentemente el Piranómetro es el sensor más propenso a sufrir variaciones entre calibraciones.

Para el segundo método de análisis, se determinó que en 11 ocasiones ha variado el FC para el actinómetro, 5 para el balanzómetro y una vez para el piranómetro.

La Tabla 4 contiene el mínimo y máximo de días que permaneció un FC para cada instrumento, así como, el valor medio de días por sensor, pero en este caso teniendo en cuenta los criterios de tolerancia del Manual de Procedimientos Actinométricos. De acuer-

**Tabla 3.** Cantidad de días transcurridos entre calibraciones por sensores para el análisis que incluye todos los cambios de factores

Sensor	Mínimo	Máximo	Media
Actinómetro	30	1381	705.5
Piranómetro	30	656	343.0
Balanzómetro	32	1352	692.0

**Tabla 4.** Cantidad de días transcurridos entre calibraciones por sensores, teniendo en cuenta los criterios de tolerancia establecidos en el Manual de Procedimientos de Actinometría

Sensor	Mínimo	Máximo	Media
Actinómetro	103	1684	893.5
Piranómetro	1693	1693	1693
Balanzómetro	466	5162	2814

do a este criterio, el sensor que menor permanencia de su FC llega a tener es el actinómetro, con un mínimo de tan solo 103 días y como promedio es también el sensor que más cambia su FC. Teniendo en cuenta la cantidad de días promedios, así como el máximo de días con el mismo FC, el balanzómetro puede considerarse como el sensor con FC más estable, llegando a permanecer hasta 5162 días, lo que equivale a más de 14 años.

Si se tiene en cuenta la diferencia entre los valores de los FC al momento del cambio, o sea, el valor que tenía el FC antes del cambio o Factor inicial (Fi) y el valor del nuevo factor o Factor final (Ff) se obtiene que, en el caso del actinómetro, en 5 ocasiones  $F_i > F_f$ . Para el único caso del piranómetro  $F_i < F_f$  y para el balanzómetro en 3 casos el  $F_i < F_f$ , mientras que en 2 ocasiones ocurre lo contrario.

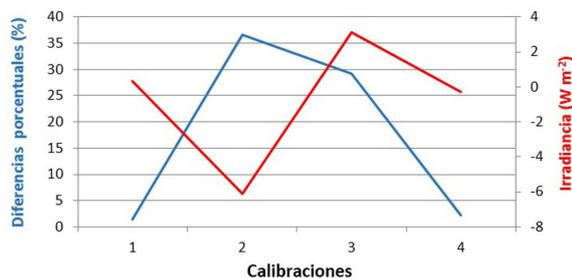
La mayor cantidad de cambios de FC del actinómetro tiene lugar entre el 2007 y el 2013 con un total de 4 casos, mientras que para el balanzómetro la mayor cantidad (3) tiene lugar en el período comprendido entre 1988 y 2010. El piranómetro por su parte cambió su FC solamente una vez entre el 2007 y el 2012.

Para un mejor análisis y comprensión de la influencia que los cambios o no de los FC puedan tener sobre los resultados de las mediciones actinométricas, los resultados de este estudio se han dividido en dos partes. La primera nombrada períodos cortos (pc) en los cuales se analizarán todos los cambios de FC que se hayan realizado en el período objeto de estudio sin tener en cuenta el criterio de tolerancia establecido. En la segunda parte, nombrada períodos largos (pl), se estudiarán los casos en los cuales se llevó a cabo efectivamente el cambio de FC, basado en el criterio de tolerancia. Estos análisis tienen como objetivo fundamental conocer cuánto pueden influir las variaciones de los FC sobre los resultados de las mediciones actinométricas y determinar así, si los valores de tolerancia hasta ahora empleados para la toma de decisión del momento de cambio de un FC son los más adecuados.

## Análisis de los períodos cortos

### Actinómetros

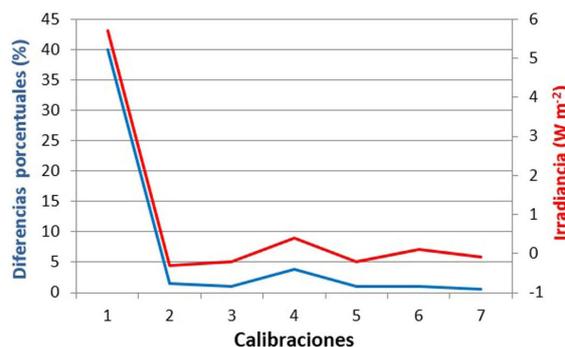
Durante el período de estudio han sido empleados en la EAC un total de cuatro actinómetros, cuyos números son: 35, 81, 684 y el 1106. Este último sólo fue utilizado por un período menor al año, entre el 19 de Noviembre de 1988 y el 28 de Septiembre de 1989 y no se le realizaron calibraciones intermedias. El primer actinómetro empleado en el período estuvo instalado desde el 1ro de Enero de 1981 hasta el 31 de Diciembre de 1982, un total de 729 días en los cuales se realizaron un total de 4 calibraciones. La [figura](#) que aparece a continuación muestra las Diferencias Porcentuales entre el valor del FC al término del período de explotación y el nuevo FC obtenido. También se muestra la diferencia entre las Irradiancias correspondientes a ambos momentos expresadas en  $Wm^{-2}$ . El valor más significativo de las diferencias tuvo lugar en la segunda calibración con una magnitud de 36.6%, lo que representa un total de  $-6.1Wm^{-2}$ , seguida de la tercera calibración con un 29.2% y solamente  $3.1Wm^{-2}$  de diferencia. En el resto de las calibraciones no hubo diferencias significativas.



**Figura 2.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias ( $Wm^{-2}$ ) para las 4 calibraciones realizadas al Actinómetro #35

El actinómetro #81 fue utilizado desde el 6 de Julio de 1983 hasta el 1ro de Julio de 1988, 1822 días en total y se realizaron en total 7 calibraciones, todas se llevaron a cabo antes del año. En la [Figura 3](#) se muestran las diferencias tanto Porcentuales como de Irradiancias, y en la primera calibración estas llegan a alcanzar 40% y  $5.7Wm^{-2}$ , respectivamente. En el resto de las calibraciones las diferencias no superaron el 4% y las irradiancias en todos los casos inferiores a  $0.4Wm^{-2}$ .

Al actinómetro anterior lo sucedió el #1106, pero este operó por menos de un año y fue la única vez que se utilizó en la EAC. Desde el 29 de Septiembre de 1989 hasta 2013 se encuentra operativo el sensor #684, con más de 8561 días de operación, lo que significa más de 23 años y medio de explotación. Duran-



**Figura 3.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias ( $Wm^{-2}$ ) para las 7 calibraciones realizadas al Actinómetro #81

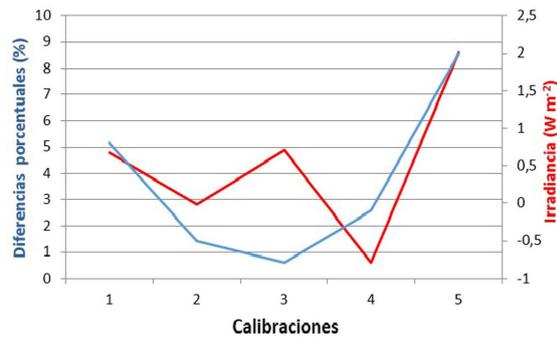
te este período de trabajo se le realizaron a este sensor un total de 21 calibraciones, en las cuales se emplearon 3 galvanómetros, por lo que en la [figura 4](#) se mostrarán los valores de las Diferencias Porcentuales y de Irradiancias, de aquellas calibraciones que fueron realizadas con un mismo galvanómetro. Las diferencias llegan a 8.6% en la quinta calibración, realizada el día 8 de Mayo de 1996, equivalente  $2Wm^{-2}$ . En el resto de las calibraciones las diferencias no superan el 5%, lo que significaría un  $0.8Wm^{-2}$ .

### Piranómetros

En el período de análisis, de los ocho piranómetros que han sido usados en la EAC, siendo sus números de serie: 1213, 1166, 1960, 1106, 706, 1094, 690 y 833, sólo el tercero que estuvo en funcionamiento desde 2 de Julio de 1988 hasta 28 de Septiembre de 1989 no experimentó variación del FC. El primer piranómetro empleado abarcó desde 1ro de Enero de 1981 hasta el 31 de Diciembre de 1982 con dos calibraciones realizadas, las cuales no mostraron variaciones significativas. El piranómetro #1166 permaneció un total de 1457 días, desde el 6 de Julio de 1983 hasta el 29 de Octubre de 1987 y se le realizaron 5 calibraciones. Como muestra la [figura 5](#), el valor más significativo fue de 28.5% al que corresponde  $-0.3Wm^{-2}$ . Los otros valores se mantuvieron cerca del 3% y alcanzaron hasta  $0.4Wm^{-2}$ .

Los piranómetros 1106, 706, 1094 y 690 abarcaron desde 29 de Septiembre de 1989 hasta el 19 de Agosto de 2002 lo que representa un total de 1281 días. Cada uno de estos instrumentos fue calibrado una vez y los valores de las diferencias porcentuales y de irradiancias que se obtuvieron no fueron significativos.

El piranómetro 833 inició desde el 8 de Diciembre de 2007 y hasta 2013 fue sometido a calibración en cinco ocasiones. La [figura 6](#) muestra la mayor diferencia porcentual con un valor de 13.6% al que corresponde un valor de irradiancia de  $-0.5Wm^{-2}$ . En las otras calibraciones los resultados son inferiores al 9.5% y la variación de los FC no supera la unidad.

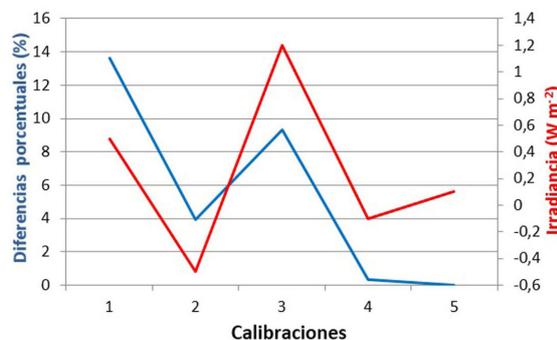


**Figura 4.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias (Wm<sup>-2</sup>) para las calibraciones realizadas al Actinómetro # 684

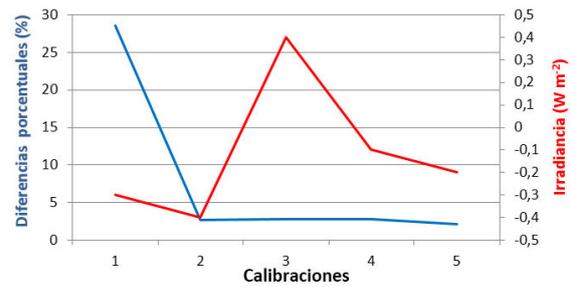
### Balanzómetros

Desde el año 1981 hasta 2013 han sido utilizados cuatro balanzómetros en la EAC, cuyos números son: 449, 460, 423 y 204. El balanzómetro #449 fue utilizado desde el 1<sup>o</sup> de Enero de 1981 hasta el 10 de Agosto de 1981, lo que representa un total de 222 días. Este instrumento recibió una calibración, obteniéndose tanto para la Diferencia Porcentual como la Irradiancia valores poco significativos. El segundo sensor estuvo instalado desde el 11 de Agosto de 1981 hasta el 24 de Noviembre de 1984, un total de 1201 días en los cuales se realizaron 3 calibraciones y se produjo variación en el FC. Al balanzómetro anterior lo sucedió el #423, con 1314 días en funcionamiento, desde el 25 de Noviembre de 1984 hasta el 1<sup>o</sup> de Julio de 1988. Durante su período de explotación fue calibrado 3 veces, obteniéndose valores de diferencias porcentuales que no sobrepasaron el 4% e Irradiancias por debajo de la unidad. El sensor #204 está operando desde el 2 de Julio de 1988 y ha sido sometido a 11 calibraciones. Como describe la *figura 7*, en la tercera calibración se muestra una diferencia porcentual de un 48%, la cual se eleva con respecto a los otros valores, y le corresponde un valor de 0.6 Wm<sup>-2</sup>. El resto de los resultados obtenidos fluctúan no apreciándose ninguno significativo.

La *tabla 5* muestra la cantidad de casos en que hubo variación en el FC de los tres sensores de prueba a



**Figura 6.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias (Wm<sup>-2</sup>) para las 6 calibraciones realizadas al Piranómetro #833

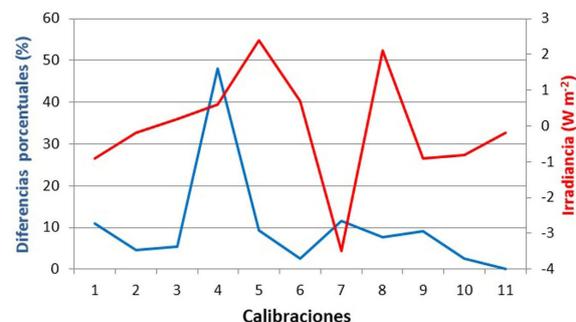


**Figura 5.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias (Wm<sup>-2</sup>) para las 6 calibraciones realizadas al Piranómetro #1166

la vez, el período en que se produjeron, la cantidad de días correspondientes al período, las Diferencias Porcentuales y de Irradiancias obtenidas. Los casos 1, 6 y 7 no muestran similitudes. Resalta el caso 2 donde las diferencias porcentuales tienen la misma magnitud y las irradiancias son prácticamente iguales. Sobresale entre todos los períodos el correspondiente al tercer caso para los tres sensores, donde tienen lugar los valores más elevados, los cuales llegan a ser de 2 órdenes de magnitud respecto al resto de los casos, corresponden por tanto a este período los mayores valores de irradiancias obtenidos para todos los casos. El período que sigue muestra iguales valores de irradiancias aunque las diferencias porcentuales no son exactamente iguales. En el quinto caso la igualdad se aprecia en las diferencias porcentuales del piranómetro y el balanzómetro. El período del 01/12/2010 al 07/03/2013 muestra igualdad en la irradiancia del actinómetro y el piranómetro.

### Análisis de períodos largos

La *Tabla 6* muestra la cantidad de actinómetros que al calibrarlos se obtuvieron resultados que generaron un cambio del FC teniendo en cuenta el criterio de la tolerancia, en el período de estudio. Se muestra además el tiempo de explotación después de efectuada la calibración, la cantidad de días que abarca el período y los valores de Diferencias Porcentuales e Irradiancias. En el análisis de los casos comprendidos dentro de los períodos considerados largos, sobresale el acti-



**Figura 7.** Diferencias Porcentuales (%) y de Irradiancias (W m<sup>-2</sup>) para las 11 calibraciones realizadas al balanzómetro #204

**Tabla 5.** Casos en que varió el FC de los tres sensores a la vez

Casos	F.inicial	F. final	Cant. Días	Actinómetro		Piranómetro		Balanzómetro	
				Wm <sup>-2</sup>	%	Wm <sup>-2</sup>	%	Wm <sup>-2</sup>	%
1	01/08/1981	29/04/1981	119	0.3	1.4	4	2.3	1.4	ND
2	25/12/1981	31/12/1982	372	0.3	2.2	0.3	2.2	0.4	2.2
3	06/07/1983	18/05/1984	318	5.7	39.7	0.3	28.5	2.8	67.6
4	24/03/1985	20/03/0986	362	0.4	3.8	0.4	2.8	0.4	3.6
5	21/03/1986	15/03/1987	360	0.2	1.1	0.1	2.8	0.5	2.8
6	29/09/1989	16/04/1990	200	0.8	4.8	0.1	0.6	0.2	4.5
7	22/07/1994	07/05/1996	656	0.1	0.6	0.4	2.7	0.6	48
8	01/12/2010	11/10/2011	315	0.5	4.1	0.5	3.9	0.9	9
9	18/01/2013	07/03/2013	49	0.1	0	0.1	0	0.2	0

**Tabla 6.** Casos en que varió el FC de los actinómetros en el Período Largo

Casos	Fecha inicial	Fecha final	C. de Días	Actinómetro		
				#35	#81	#684
1	30/04/1981	10/08/1981	103	-6.1	36.6	
2	11/08/1981	24/12/1981	136	3.1	0	
3	06/07/1983	18/05/1984	318		5.7	34
4	29/09/1989	16/04/1990	200			0.8
5	17/04/1990	21/07/1994	1557			-1.3
6	22/07/1994	01/03/1999	1684			1.9
7	12/02/2000	23/02/2001	378			-0.5
8	30/06/2007	03/03/2009	613			0.6
9	04/03/2009	04/11/2009	246			-0.4
10	05/11/2009	11/10/2011	706			-0.4
11	12/10/2011	16/02/2012	128			0.4

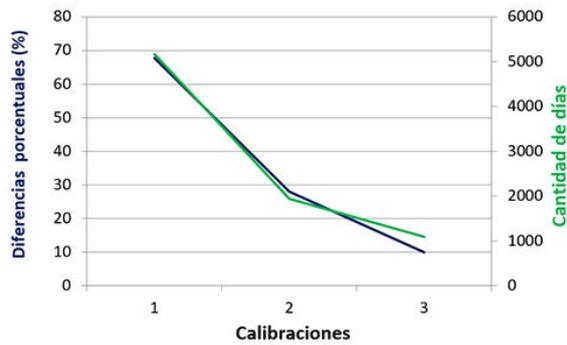
nómetro, ya que es el sensor que presenta la mayor cantidad de calibraciones en las cuales fue necesario cambiar el FC. En la década de los 80 se concentran los valores más elevados en cuanto a las Diferencias Porcentuales, el sensor #35 con 36.6% y el # 81 con 34%, al que corresponde el mayor valor de irradiancia con 5.7 Wm<sup>-2</sup>. De los 11 casos de calibraciones sólo 6 se efectuaron antes del año. De los 5 casos restantes se destacan el quinto y sexto que corresponden al actinómetro 684 en el que los períodos de explotación abarcaron más de 4 años y es precisamente en esos períodos donde las diferencias porcentuales son mayores para este actinómetro. El resto de los valores obtenidos no se consideran relevantes.

En cuanto al piranómetro sólo existe un caso para todo el período de estudio que pertenece al sensor #833. Este instrumento permaneció sin cambio de factor desde el 30 de Junio de 2007 hasta el 16 de Febrero 2012, lo que representa un total de 1693 días, más de 4 años. La diferencia entre las irradiancias fueron de 1.2 Wm<sup>-2</sup> y la diferencia porcentual de 32.8%.

Después de haber analizado los balanzómetros en períodos cortos, se aprecia que es el sensor más estable en el tiempo; pero a la vez es el que mayor grado de error presenta. La siguiente [tabla](#) muestra la cantidad de balanzómetros que al calibrarlos se produjo un cambio del FC, teniendo en cuenta el criterio de la tolerancia. Como se observa, en todos los casos las

calibraciones fueron realizadas en períodos superiores al año de explotación. El sensor #204 es el que ha permanecido mayor cantidad de días sin que se cambie el FC. El más largo de los períodos abarcó alrededor de 14 años y es al que pertenecen los máximos valores tanto de Irradiancias como de diferencias porcentuales. En general los valores de las diferencias porcentuales para ambos sensores son elevados, excepto en el último caso donde no supera el 10%.

La [figura 8](#) muestra el comportamiento de las Diferencias Porcentuales y la Cantidad de días del período a la que corresponden dichas diferencias para el actinómetro #204. Luego de su primera calibración, el período de explotación de este sensor superó los 5000 días y a él corresponde la mayor diferencia de un 67.8%. Al segundo período que fue de 1936 días le pertenece un valor de 27.9% y la última etapa que abarcó 1098 días tuvo una diferencia porcentual de 9.9%. Es de destacar que a medida que los períodos entre calibraciones fueron disminuyendo, los valores de las diferencias porcentuales también lo hicieron. De esto se desprende que para el caso particular del balanzómetro debe realizarse un análisis sobre el valor de tolerancia más adecuado ya que este sensor es el de mayor valor de tolerancia con un 10%. Partiendo de los resultados obtenidos sería recomendable determinar el valor de tolerancia más adecuado, lo cual implicaría que los FC no permanezcan durante tanto tiempo.



**Figura 8.** Diferencias Porcentuales (%) y Cantidad de días para las 3 calibraciones realizadas al balanzómetro #204 durante el Período Largo

Luego de analizados los Períodos Cortos se investigó cuántos de estos aparecían dentro de los Períodos Largos. La [tabla 8](#) contiene los casos en que esto ocurre para cada tipo de sensor de prueba, las Diferencias Porcentuales de los PL y PC, así como, el cambio de Factor de Conversión para los PL y para los PC. De todos los sensores que fueron utilizados durante el período de estudio, sólo cumplieron con esta condición uno de cada tipo, el Actinómetro #684, el Piranómetro #833 y el Balanzómetro #204. Las diferencias porcentuales de los Períodos Largos son mayores que las de los Períodos Cortos, exceptuando el caso 3 del actinómetro, donde la diferencia del PL es de 2.8% mientras que dos de los valores de PC que pertenecen a ese caso superan el 4%. En el segundo caso del balanzómetro hay una etapa en que el valor de la diferencia porcentual se eleva en un 48%, con respecto al resto de las diferencias que no superan el 11%.

**Tabla 7.** Casos en que varió el FC de los balanzómetros en el Período Largo

Casos	Fecha inicial	Fecha final	C. de Días	Balanzómetro			
				#460		#204	
				W/m <sup>2</sup>	%	W/m <sup>2</sup>	%
1	11/08/1981	07/02/1983	546	2.0	27.9		
2	08/02/1983	18/05/1984	466	-2.8	55.6		
3	02/07/1988	19/08/2002	5162			2.8	67.8
4	20/08/2002	07/12/2007	1936			-3.5	27.9
5	08/12/2007	30/11/2010	1089			2.1	9.9

**Tabla 8.** Casos de FC que cambian en Períodos Cortos dentro de Períodos Largos

Casos	Diferencia Porcentual (%)	Cambio de FC para Pl	Cambio de FC para Pc	Diferencia Porcentual (%)
Actinómetro # 684	1	12.2	0.0174	2.8
			0.0169	4.9
	2	15.9	0.0161	0.6
			0.0161	8.6
			0.0180	4.2
			0.0122	1.6
3	2.8	0.0124	4.1	
		0.0123	13.6	
		0.0118	3.9	
Piranómetro # 833	1	32.8	0.0123	9.3
			0.0118	2.2
			0.0130	---
Balanzómetro # 204	1	27.9	0.0156	10.9
			0.0176	4.5
			0.0122	5.3
	2	67.8	0.0113	48
			0.0111	9.2
			0.0113	2.6
			0.0119	
			0.0143	
			0.0150	

Para llevar a cabo el siguiente análisis fueron seleccionados el caso 3 del actinómetro, el único del piranómetro y el segundo caso del balanzómetro, ya que son los más representativos, además tanto el primero como el segundo sensor se encuentran acoplados al galvanómetro #11984. En las figuras 9, 10 y 11 se muestra el comportamiento de las Irradiancias expresadas en  $Wm^{-2}$  de los Períodos Cortos (líneas continuas, Figura 9 y 10) y la de los Períodos Largos (líneas discontinuas, Figura 9 y 10) al que corresponden cada uno, para los casos seleccionados de cada sensor. Como se ha expresado anteriormente en los PC la variación que sufre el FC es un valor que habitualmente no se tiene en cuenta ya que no cumple con el criterio de la tolerancia.

En la Figura 9 se puede apreciar que las diferencias entre los periodos cortos y largo llegan a alcanzar más de  $13 Wm^{-2}$  entre uno y otro, en el mes de octubre de 2010 y en el caso del mes de noviembre del mismo año, cuando se realizó otra calibración la diferencia supera los  $11 Wm^{-2}$ . Estos valores pueden ser considerados como altos, teniendo en cuenta que para el caso del actinómetro corresponde la menor tolerancia, con tan solo un 3%.

La figura 10, donde se representan los periodos, tanto cortos como largos, correspondientes al piranómetro,

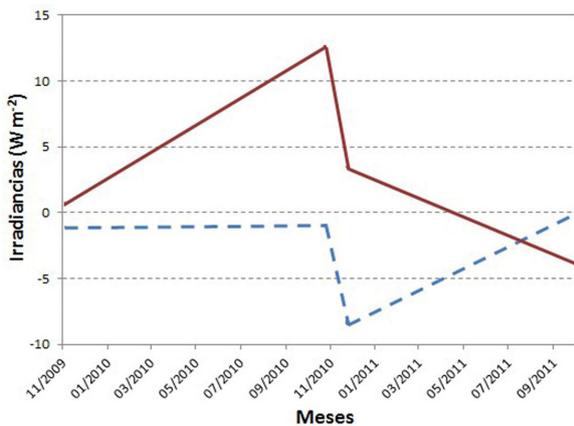


Figura 9. Diferencias porcentuales de los Pc en el PI del Actinómetro # 684, en línea azul el valor

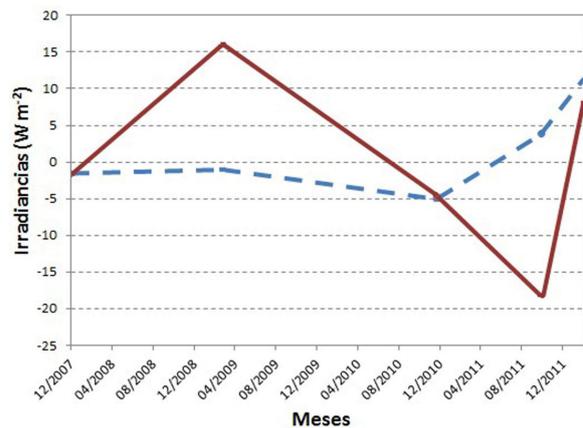


Figura 10. Diferencias porcentuales de los Pc en el PI del Piranómetro # 833

se aprecia que la mayor diferencia entre ambos periodos se encuentra en el mes de octubre de 2011, con un valor superior a los  $22 Wm^{-2}$  de diferencia entre ellos, le sigue en magnitud la diferencia en el mes de marzo de 2009 con una valor de más de  $17 Wm^{-2}$ .

En la Figura 11 se representan las diferencias de los periodos para el caso del balanzómetro, donde resalta a primera vista la alta variabilidad de este sensor, por lo que el análisis de este sensor en particular resulta muy complejo. En general se puede apreciar una alta variación en las diferencias porcentuales y un incremento considerable de estas durante el período comprendido entre los finales de 1999 y 2002, correspondiente al PI. Excepto los dos primeros periodos cortos, donde existen diferencias positivas y negativas en el resto las diferencias solamente tienen valores negativos. Es importante señalar que aunque el balanzómetro es el sensor que posee el mayor valor de tolerancia (10%), las diferencias son considerablemente mayores al resto de los sensores analizados. Este análisis debe tomarse en cuenta para analizar si es recomendable o no reducir el valor de tolerancia hasta ahora empleado en la red de estaciones como criterio para la toma de decisión sobre el cambio o no del factor de calibración.

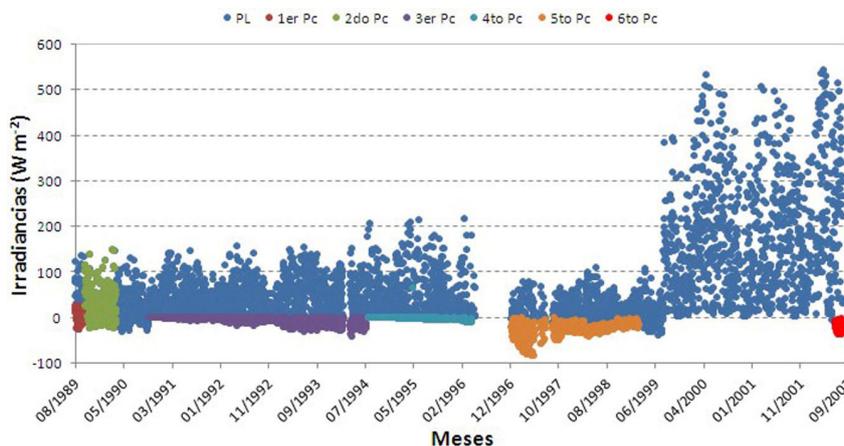


Figura 11. Diferencias porcentuales de los Pc en el PI del Balanzómetro # 204

Las variaciones que se produzcan en los factores de conversión, tanto del piranómetro como el actinómetro (mediciones de irradiancias difusa y directa, respectivamente), afectan la magnitud de la irradiancia global. En la **Tabla 9** se muestran, a modo de ejemplo, cuanto pueden afectar las variaciones de los factores de calibración, de los sensores antes mencionados, las magnitudes de la irradiancia global.

**Tabla 9.** Irradiancias expresadas en  $Wm^{-2}$  para tres Periodos Cortos (Pc) donde coinciden el piranómetro y el actinómetro dentro del Período Largo (Pl)

Periodos	S	D	Q
1 <sup>er</sup> Pc	0.98	4.46	4.92
2 <sup>do</sup> Pc	1.87	-5.12	-6.20
3 <sup>er</sup> Pc	-1.10	2.34	3.59
Pl	0	2.38	2.38

Como se puede apreciar existe una relación directa entre las variaciones de las diferencias porcentuales, tanto para la irradiancia directa como difusa, respecto a la global. Sobresale el 2do período corto donde la diferencia porcentual alcanza más de  $6 Wm^{-2}$ . Sin embargo, si se analiza la variación del período largo correspondiente, esta diferencia es de apenas  $2.38 Wm^{-2}$ . Esto reafirma lo hasta ahora planteado de la necesidad de realizar un trabajo encaminado a la evaluación de los valores de tolerancia hasta ahora empleados.

## CONCLUSIONES

Se determina la metodología que permite establecer el reprocesamiento de las observaciones actinométricas luego de que sea realizado el proceso de postcalibración de los sensores actinométricos, una vez concluido el período de explotación de los mismos.

De acuerdo a los resultados derivados de este trabajo, el balanzómetro es el sensor con mayor variación en las diferencias porcentuales entre los datos procesados con el factor de trabajo inicial y los procesados luego de aplicar la metodología. Estos resultados son significativamente importantes en el análisis de los períodos largos.

La aplicación de la metodología conllevará a un incremento en la calidad de los datos actinométricos.

## REFERENCIAS

- Acea, R. 2010. *Manual de Procedimiento de Observaciones Actinométricas*, Cuba: Camagüey, 86, No publicado [Consulted: Ene 5, 2020].
- Antuña, J.C.; Estevan, R.; Fonte, A.; Barja, B.; Acea, R.; Hernández, C. & Hernández, T. 2010. *Recuperación de la Base de Datos de Radiación Solar de la Estación Camagüey*. (Sistema integrado de observaciones de radiación solar en Cuba), Informe Científico Técnico, PNCT No. 01301216, Cuba: Centro Meteorológico Camagüey ,3p., Available: [http://www.goac.cu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4&Itemid=4&lang=es](http://www.goac.cu/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=4&lang=es), [Consulted: Ene 6, 2020].
- Estevan, R.; Antuña J. C.; Barja, B.; García, F.; Hernández, C. E.; Cordero, T. & Morejón, I. Y. 2012. *Climatología de la Radiación Solar en Camagüey 1981-2010*. (Sistema integrado de observaciones de radiación solar en Cuba), Informe Científico Técnico, PNCT No. 01301216, Cuba: Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, #p Available: [http://www.goac.cu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=288%3AReportes&catid=39%3Alic-frank-garciaparrado&Itemid=89&lang=es](http://www.goac.cu/index.php?option=com_content&view=article&id=288%3AReportes&catid=39%3Alic-frank-garciaparrado&Itemid=89&lang=es), [Consulted: Ene 5, 2020].
- Polo, J. 2010. *Optimización de la estimación de modelos de radiación solar a partir de imágenes de satélite*. Tesis Doctoral, Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, 25., Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/10855/1/T31597.pdf#%5B%7B%22num%22%3A67%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22FitH%22%7D%2C656%5D>, [Consulted: Ene 7, 2020].
- Raichijk, C. & Taddei, F. 2012. “Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria”. *AVERMA*, 16: 11.23-11.28, ISSN: 0329-5184.

*Ailin Agüero Moronta*. Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba. E-mail: [ailinaguero86@gmail.com](mailto:ailinaguero86@gmail.com)  
*René Estevan Arredondo*. Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba  
*Yarisbel Marialis Morera Isla*. Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba

**Conflicto de interés.** Declaramos, no tener ningún conflicto de interés

**Contribución de autoría:** Concepción de la idea: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo y Yarisbel Marialis Morera Isla**. Manejo de los datos: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo y Yarisbel Marialis Morera Isla**. Análisis de los datos: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo y Yarisbel Marialis Morera Isla**. Investigación: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo**. Metodología: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo**. Supervisión: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo**. Validación de los resultados: **Ailin Agüero Moronta, René Estevan Arredondo**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)