

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUAL DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS USANDO UN  
PIRANÓMETRO DE REFERENCIA SEGÚN LA NORMA ISO 9847

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN SOLAR  
(PIRANÓMETROS)

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JUAN PABLO MORALES POZO

[juan.morales02@epn.edu.ec](mailto:juan.morales02@epn.edu.ec)

DIRECTOR: Dr. FREDDY GEOVANNY ORDÓÑEZ MALLA

[freddy.ordonez@epn.edu.ec](mailto:freddy.ordonez@epn.edu.ec)

DMQ, febrero 2024

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Juan Pablo Morales Pozo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**JUAN PABLO MORALES POZO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Juan Pablo Morales Pozo, bajo mi supervisión.

---

**Dr. FREDDY ORDÓÑEZ MALLA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Juan Pablo Morales Pozo

Dr. Freddy Ordóñez Malla

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Rómulo y Emma, con su amor, paciencia y sabiduría han sido la principal fuente de motivación para culminar con este trayecto en mi vida académica.

A mis amigos y familiares, sus risas y consejos han hecho a meno este arduo recorrido.

Este trabajo es dedicado a cada uno de ustedes, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida personal y académica. Recuerden que todo es posible con Dios, amor y constancia.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios y a mis padres, que sin ellos no hubiera sido posible haber culminado con este gran logro.

A la Escuela Politécnica Nacional, por sus valiosas enseñanzas y lecciones a lo largo de estos últimos años.

Al Dr. Freddy Ordóñez, por su guía y grandes conocimientos que fueron las principales bases para el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de investigación SCINERGY, por los equipos e instrumentos con los que se pudo realizar este trabajo.

A mis amigos y familiares, que de manera directa e indirecta han contribuido en mi desarrollo personal y profesional.

Les estoy infinitamente agradecido.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Alcance .....	3
1.4 Marco teórico .....	4
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1 Interpretación de la norma ISO 9847 .....	17
2.2 Experimentación y Tratamiento matemático .....	21
2.3 Elaboración del manual de calibración.....	33
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	34
3.1 Resultados y Discusión .....	34
3.2 Conclusiones.....	60
3.3 Recomendaciones.....	61
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
5. ANEXOS.....	66
ANEXO I. GRÁFICAS COMPARANDO LA IRRADIANCIA ANTES, PARA CADA F(j) Y DESPUÉS DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN .....	66
ANEXO II. EJEMPLO CALIBRACIÓN.....	132
ANEXO III. INFORMES DE CALIBRACIÓN TIPO IA .....	146
.....	147
ANEXO IV. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN ORIGINAL DE LOS PIRANÓMETROS USADOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	148

ANEXO V. MANUAL DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS CON EL MÉTODO TIPO IA.....	152
---	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Irradiancia espectral ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) vs Longitud de onda ( $\mu m$ )[7] .....	4
<b>Figura 1.2.</b> Tipos de radiación solar[2, p. 11] .....	5
<b>Figura 1.3.</b> Piranómetro del tipo termoeléctrico .....	6
<b>Figura 1.4.</b> Partes de un piranómetro [8, p. 14] .....	6
<b>Figura 1.5.</b> Cadena secuencial de estándares, cantidades y medición[10, p. 10].....	8
<b>Figura 1.6.</b> Pirámide jerárquica de trazabilidad mundial. ....	9
<b>Figura 1.7.</b> Mapa de GHI en Ecuador ( $kWh/m^2 \cdot día$ )[2, p. 12].....	12
<b>Figura 1.8.</b> Panel fotovoltaico de dos ejes.....	13
<b>Figura 1.9.</b> Diseño de sistemas pasivos de calefacción solar[25].....	13
<b>Figura 1.10.</b> Pronóstico radiación ultravioleta[30].....	14
<b>Figura 1.11.</b> Ubicación de estaciones meteorológicas en Ecuador[31, p. 65].....	15
<b>Figura 2.1.</b> Condiciones de cielo sin nubes y estable .....	19
<b>Figura 2.2.</b> Condiciones de cielo con algunas nubes e inestable .....	19
<b>Figura 2.3.</b> Condiciones de cielo nublado e inestable.....	20
<b>Figura 2.4.</b> Instalación de piranómetros en la mesa de calibración común al aire libre....	22
<b>Figura 2.5.</b> Polaridad del piranómetro MS 80[8] .....	22
<b>Figura 2.6.</b> Polaridad del piranómetro MS 40[9] .....	22
<b>Figura 2.7.</b> Polaridad de las entradas analógicas del Data Logger Novus[37].....	23
<b>Figura 2.8.</b> Conexión de cables de señal a las entradas del Data Logger .....	23
<b>Figura 2.9.</b> Secuencia lógica para configurar un Data Logger .....	24
<b>Figura 2.10.</b> Nuevo archivo de configuración .....	24
<b>Figura 2.11.</b> Configuración de canales analógicos .....	25
<b>Figura 2.12.</b> Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ) para el sensor MS 80 .....	25
<b>Figura 2.13.</b> Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ) para el sensor MS 40 .....	26
<b>Figura 2.14.</b> Configuración para el registro de mediciones para los dos piranómetros ....	26
<b>Figura 2.15.</b> Envío de la nueva configuración al Data Logger .....	27
<b>Figura 2.16.</b> Configuración de diagnóstico general .....	27
<b>Figura 2.17.</b> Diagnóstico de irradiancia respecto al tiempo. ....	28
<b>Figura 2.18.</b> Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo nublado e inestable .....	28
<b>Figura 2.19.</b> Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo sin nubes y estable.....	29
<b>Figura 2.20.</b> Tabla de distribución horaria .....	29
<b>Figura 3.1.</b> Histograma y polígono de frecuencias de los factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo nublado e inestable .....	37
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama de cajas y bigotes de los factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo nublado e inestable .....	38
<b>Figura 3.3.</b> Histograma y polígono de frecuencias de los factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo sin nubes y estable. ....	40
<b>Figura 3.4</b> Diagrama de cajas y bigotes de los factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	41

<b>Figura 3.5.</b> Análisis RMSE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo nublado e inestable .....	43
<b>Figura 3.6.</b> Análisis MBE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo nublado e inestable .....	46
<b>Figura 3.7.</b> Análisis MBE vs factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo nublado e inestable .....	47
<b>Figura 3.8.</b> Análisis RMSE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	49
<b>Figura 3.9.</b> Análisis MBE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	50
<b>Figura 3.10.</b> Análisis MBE vs Factores $F(j)$ en condiciones de cielo sin nubes.....	51
<b>Figura 3.11.</b> Dispersión de la irradiancia del piranómetro de prueba respecto a la irradiancia del piranómetro patrón, en condiciones de cielo nublado e inestable .....	53
<b>Figura 3.12.</b> Acercamiento para verificar el desajuste de la Figura 3.11.....	54
<b>Figura 3.13.</b> GHI promedio respecto al número de series de medición en condiciones de cielo nublado e inestable .....	55
<b>Figura 3.14.</b> Acercamiento para verificar el desajuste de la Figura 3.13.....	55
<b>Figura 3.15.</b> Dispersión de la irradiancia del piranómetro de prueba respecto a la irradiancia del piranómetro patrón, en condiciones de cielo sin nubes y estable.....	56
<b>Figura 3.16.</b> GHI promedio respecto al número de series de medición en condiciones de cielo sin nubes y estable.....	57
<b>Figura 3.17.</b> Ejemplo de inestabilidad a causa de la nubosidad .....	58
<b>Figura 3.18.</b> Comparación de diagramas de cajas y bigotes .....	59
<b>Figura 5.1.</b> Instalación de piranómetros en la mesa calibración común, al aire libre (Ejemplo) .....	133
<b>Figura 5.2.</b> Polaridad del piranómetro MS 80 (Ejemplo) .....	133
<b>Figura 5.3.</b> Polaridad del piranómetro MS 40 (Ejemplo) .....	133
<b>Figura 5.4.</b> Polaridad de las entradas analógicas del Data Logger Novus (Ejemplo).....	134
<b>Figura 5.5.</b> Conexión de cables de señal al Data Logger (Ejemplo) .....	134
<b>Figura 5.6.</b> Nuevo archivo de configuración (Ejemplo) .....	135
<b>Figura 5.7.</b> Configuración de canales analógicos (Ejemplo).....	135
<b>Figura 5.8.</b> Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ) para el sensor MS 80 (Ejemplo) .....	136
<b>Figura 5.9.</b> Conversión de señal eléctrica de voltaje(mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ) para el sensor MS 40 (Ejemplo) .....	136
<b>Figura 5.10.</b> Configuración para el registro de mediciones en los dos piranómetros (Ejemplo) .....	137
<b>Figura 5.11.</b> Envío de la nueva configuración al Data Logger .....	137
<b>Figura 5.12.</b> Configuración de diagnóstico general (Ejemplo) .....	138
<b>Figura 5.13.</b> Diagnóstico de irradiancias respecto al tiempo (Ejemplo) .....	138
<b>Figura 5.14.</b> Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo sin nubes y estable (Ejemplo).....	139
<b>Figura 5.15.</b> Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo con nubes e inestable (Ejemplo) .....	139
<b>Figura 5.16.</b> Tabla distribución horaria (Ejemplo) .....	140
<b>Figura 5.17.</b> Ejemplo de cálculo para encontrar los factores $F(ij)$ de cada lectura simultanea (Ejemplo) .....	141
<b>Figura 5.18.</b> Cálculo para encontrar el factor $F(j)$ de una serie de medición (Ejemplo) .....	142
<b>Figura 5.19.</b> Estabilidad de medición para en una serie [ $\sigma (Fij)$ ].....	142
<b>Figura 5.20.</b> Filtro de desviación (Ejemplo) .....	143

**Figura 5.21.** Repetición del octavo paso en base a los datos limpios (Ejemplo).....144

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo nublado .....	35
<b>Tabla 3.2.</b> Factor de calibración final en condiciones de cielo nublado.....	36
<b>Tabla 3.3.</b> Tabla de frecuencias de los factores de calibración $F_j$ en condiciones de cielo nublado e inestable.....	37
<b>Tabla 3.4.</b> Factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	39
<b>Tabla 3.5.</b> Factor de calibración final en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	40
<b>Tabla 3.6.</b> Tabla de frecuencias de los factores de calibración $F(j)$ en condiciones de cielo sin nubes y estable.....	40
<b>Tabla 3.7.</b> Análisis RMSE en condiciones de cielo nublado e inestable.....	42
<b>Tabla 3.8.</b> Análisis MBE en condiciones de cielo nublado e inestable .....	45
<b>Tabla 3.9.</b> Análisis RMSE en condiciones de cielo sin nubes y estable .....	48
<b>Tabla 3.10.</b> Análisis MBE en condiciones de cielo sin nubes y estable.....	50
<b>Tabla 5.1.</b> Factores de calibración por serie $F(j)$ (Ejemplo) .....	145
<b>Tabla 5.2.</b> Factor de calibración final (Ejemplo).....	145

## RESUMEN

La radiación solar es la más antigua fuente de energía de la humanidad. Su comprensión desde varios campos del conocimiento, ha sido una constante a lo largo de la historia de la humanidad. Por ejemplo; se la ha estudiado en el aprovechamiento energético con la implementación de tecnologías solares, o en el campo de la salud, analizando la influencia de la radiación UV en la piel de las personas.

Por su gran importancia, es necesario tener instrumentos capaces de medir la radiación solar de manera precisa y confiable. Uno de estos instrumentos es el piranómetro, que es capaz de medir la irradiancia solar global en un plano horizontal.

A medida que estos instrumentos estén expuestos constantemente a factores ambientales, como la humedad y calor, son propensos a sufrir desajustes en su medida. Por tal motivo, este documento (TIC) presenta una justificación teórica y experimental para la elaboración de un manual de calibración de piranómetros según la norma ISO 9847. Principalmente, este manual está orientado al personal técnico encargado de la supervisión de estos instrumentos, por lo que su contenido tiene que ser confiable y claro.

A lo largo del desarrollo del TIC, se analizó dos procesos de calibración con el método (tipo Ia) en diferentes condiciones de cielo, con el fin de analizar el ajuste entre el piranómetro de prueba y el patrón, en cada proceso de calibración.

**PALABRAS CLAVE:** piranómetro, radiación solar, metrología, trazabilidad, error, ajuste, calibración, norma ISO 9847.

## ABSTRACT

Solar radiation is humanity's oldest source of energy. Its understanding from various fields of knowledge has been a constant throughout the history of humanity. For example, it has been studied in the context of energy utilization through the implementation of solar technologies, or in the field of health, analyzing the influence of UV radiation on people's skin.

Due to its great importance, it is necessary to have instruments capable of measuring solar radiation accurately and reliably. One such instruments is the pyranometer, design to measure global solar irradiance in a horizontal plane.

These instruments are constantly exposed to environmental factors such as humidity and heat, making them susceptible to measurement misalignments. For this reason, this document (TIC) will present a theoretical and experimental justification for the preparation of a pyranometer calibration manual, according to the ISO 9847 standard. Mainly, this calibration manual will be aimed at the technical personnel in charge of supervising these instruments, so its content has to be reliable and clear.

Throughout the development of the TIC, two calibration processes were analyzed with the method (type Ia) in different sky conditions, in order to analyze the adjustment between the test and standard pyranometer, in each calibration process.

**KEYWORDS:** pyranometer, solar radiation, metrology, traceability, uncertainty, adjustment, calibration, ISO 9847 standard.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La radiación solar es una forma de energía emitida por el sol, la cual se propaga por el espacio en forma de ondas electromagnéticas [1]. La radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra varía por diversos factores, entre ellos: la posición geográfica y las condiciones climáticas. Esta radiación fuera de la atmósfera se la suele considerar constante y se la conoce como constante solar, la cual tiene un valor de  $1368 \pm 0,65$  [W/m<sup>2</sup>] [2, p. 11]. Cuando esta radiación atraviesa la atmósfera, puede ser absorbida o redireccionada por los componentes de la atmósfera como el ozono, vapor de agua, aerosoles y material particulado [2, p. 11].

La radiación que pasa por la atmósfera sin cambiar su dirección se la conoce como irradiancia normal directa (DNI), y la que ha sido redireccionada se la conoce como irradiancia horizontal difusa (DHI, medida sobre una superficie horizontal). La suma de estos dos tipos de radiación da como resultado a la irradiancia global horizontal (GHI), y su expresión matemática es la siguiente:  $GHI = DHI + DNI * \cos(\theta)$ , donde  $\theta$  representa el ángulo cenital solar [2, p. 11], [3].

El estudio y análisis de la radiación solar es de suma importancia para un amplio campo de aplicaciones, como son la ingeniería, salud, arquitectura, agricultura y meteorología[1]. Como ejemplo podemos mencionar la generación de electricidad por medio de paneles fotovoltaicos, el diseño y uso de sistemas de colectores solares para el aumento de temperatura del agua, y la influencia de la radiación ultravioleta (UV) en la piel, que causa daños en la salud [1] . Por lo que su medición con instrumentos de medida es de gran importancia.

El piranómetro es un instrumento diseñado específicamente para la medición de la radiación solar global (GHI) incidente en un rango de longitud de onda de aproximadamente  $0,3 \mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$  o  $4 \mu\text{m}$  [4, p. 2]. Existen varios tipos de piranómetros entre los que destacan aquellos que usan los efectos “termoeléctricos” y “fotoeléctricos”. Por un lado, los piranómetros termoeléctricos están equipados con una termopila, la cual mide la diferencia de temperatura entre dos superficies receptoras. Por otro lado, los piranómetros fotoeléctricos están equipados con un receptor fotoeléctrico, el cual utiliza un fotodiodo de silicio o una cédula fotovoltaica, que mide la energía fotovoltaica generada [4, p. 4].

La norma ISO 9847 establece los requerimientos y procedimientos para la calibración de un piranómetro de prueba comparándolo con un piranómetro de referencia que esté eventualmente calibrado y certificado. La norma ISO 9847 presenta dos métodos de calibración, los cuales son:

Calibración exterior (tipo I): Esta calibración emplea la radiación solar como fuente de energía. La calibración exterior o al aire libre de los piranómetros de prueba se la puede realizar con los dos instrumentos en una posición horizontal plana (inclinado a cero) (tipo Ia), en una posición con un ángulo de inclinación (tipo Ib) o con un ángulo en incidencia normal (tipo Ic) [5, p. 1].

Calibración interior (tipo II): Esta calibración emplea una fuente de radiación artificial parecida a la del sol. La calibración interior de los piranómetros se la puede realizar empleando una lámpara sombreada (tipo IIa) o sin sombra (tipo IIb), o en una posición con un ángulo en incidencia normal (tipo IIc) [5, p. 1].

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un manual de procedimientos de calibración de piranómetros siguiendo la norma ISO 9847. Este manual pretende servir de guía para que el personal técnico que calibre piranómetros tenga una orientación clara y concisa del procedimiento de calibración.

## **1.1 Objetivo general**

Elaboración de un manual de calibración de un piranómetro usando un piranómetro de referencia de acuerdo con la norma ISO 9847.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Investigar conceptos fundamentales acerca de la radiación solar, meteorología, metrología, etc. Con la finalidad de construir una base teórica sólida para la elaboración del manual.
2. Realizar una campaña de experimentación y recolección de datos con el piranómetro de referencia y un piranómetro de prueba, con el objetivo de sistematizar el proceso de calibración.
3. Redactar el manual de calibración del piranómetro según la norma ISO 9847, con el cual se concluya el proceso y análisis de calibración de los instrumentos de medición de radiación solar.

## **1.3 Alcance**

La elaboración del manual de calibración de piranómetros tiene como alcance la elaboración de un documento (trabajo de integración curricular) que justifica teóricamente el manual de calibración. El TIC contendrá conceptos fundamentales de radiación solar, metrología, meteorología y aplicación y funcionamiento de piranómetros. Por otra parte, el manual detallará los procedimientos a seguir para la calibración de piranómetros siguiendo la norma ISO 9847. Esta norma presenta dos métodos de calibración de los piranómetros de prueba, de acuerdo con los instrumentos y equipos que se tienen en la estación meteorológica de la Escuela Politécnica Nacional de la facultad de Ingeniería Mecánica, se va a realizar la calibración del piranómetro de prueba con el método de calibración exterior (tipo Ia), el cual utiliza como fuente la radiación solar de la ciudad de Quito y con el piranómetro en una posición horizontal (inclinación cero). Además, esta norma establece la calibración de los piranómetros de prueba independientemente de su tipo, es decir que no existe restricción alguna si se requiere calibrar un piranómetro fotoeléctrico o termoeléctrico.

## 1.4 Marco teórico

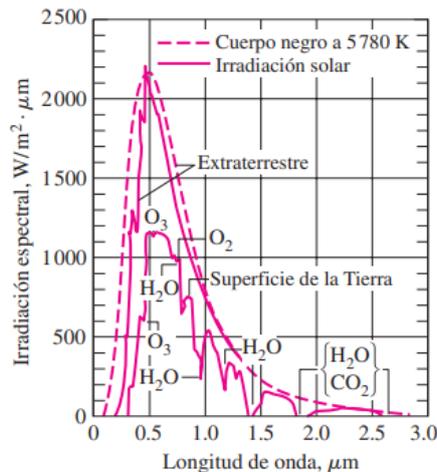
### 1.4.1 Definiciones

En esta sección se exponen los conceptos fundamentales para la comprensión del TIC y el manual de calibración.

#### 1.4.1.1 Radiación Solar

La radiación solar es la energía emitida por el sol, la cual recorre el espacio en forma de ondas electromagnéticas e incide en la tierra, manifestándose como luz y calor [1], [6]. A este tipo de energía se la puede cuantificar mediante un concepto llamado irradiancia, que es la velocidad a la que los rayos solares se proyectan sobre un superficie, y se la expresa generalmente en  $W/m^2$  [3, p. 10].

La radiación solar que llega a la superficie terrestre varía por diversos factores, entre ellos la posición geográfica y las condiciones meteorológicas. El flujo promedio de radiación solar fuera de la atmósfera, se lo conoce como constante solar extraterrestre ( $G_{sc}$ ), y tiene un valor estimado de  $1368 \pm 0,65 W/m^2$ [2, p. 11], [3].



**Figura 1.1.** Irradiancia espectral ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) vs Longitud de onda ( $\mu m$ )[7]

Según la Figura 1.1, donde se observa el comportamiento de la irradiancia solar en diferentes longitudes de onda ( $\mu m$ ). Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, interactúa con sus componentes, que absorben y/o redireccionan una parte de ella. Entre estos componentes está la capa de ozono ( $O_3$ ), que interviene como un escudo absorbiendo gran parte de la radiación UV, o el vapor de agua ( $H_2O$ ), que absorbe partes de la radiación infrarroja [3], [7, p. 709].

### 1.4.1.2 Tipos de radiación solar

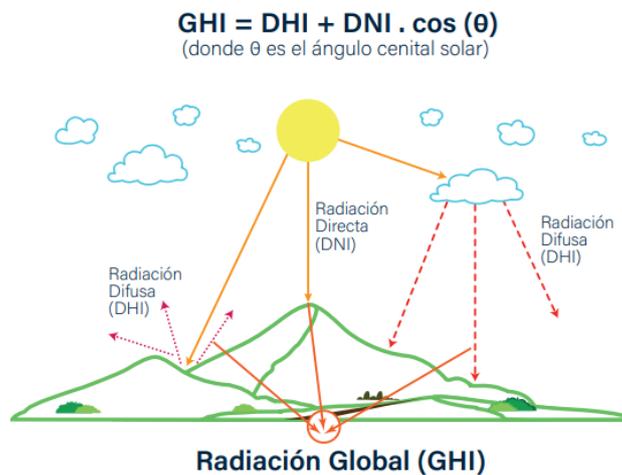
La radiación solar se mide de tres maneras: La primera se la conoce como Irradiancia Global Horizontal (GHI), que es la radiación total medida sobre una superficie horizontal. La segunda se la conoce como Irradiancia Normal Directa (DNI), y es la radiación que llega directamente a la superficie terrestre sin interactuar con la atmósfera y se la mide en el plano perpendicular a la posición solar. Y la tercera se la conoce como Irradiancia Horizontal Difusa (DHI), que es la radiación redireccionada por la atmósfera y se la mide sobre una superficie horizontal [2, p. 11], [3].

Adicionalmente, la GHI está conformada por la DNI y la DHI, tal como se observa en la Ecuación 1.1 [2, p. 11], donde  $\theta$  representa el ángulo cenital solar.

$$GHI = DHI + DNI * \cos(\theta)$$

**Ecuación 1.1.** Relación matemática de la GHI[2, p. 11]

Resumidamente, en la Figura 1.2 se muestra un esquema de las componentes que conforman la GHI.



**Figura 1.2.** Tipos de radiación solar[2, p. 11]

### 1.4.1.3 Instrumentos que miden la radiación solar (Piranómetros)

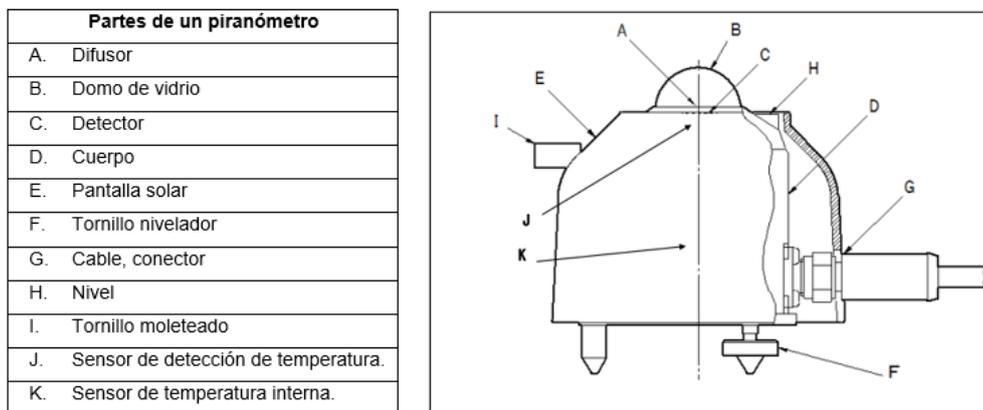
Existen varios instrumentos que pueden cuantificar o medir la radiación solar, uno de los más destacados es el piranómetro. Un piranómetro es un radiómetro capaz de medir la radiación solar global en plano horizontal (GHI), en un rango de medición de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $3$  o  $4 \mu\text{m}$  a lo largo de la longitud de onda [4, p. 2].

En la Figura 1.3, se evidencia un ejemplo de piranómetro del tipo “termoeléctrico”, el cual está integrado por una termopila que cuantifica la radiación solar por una diferencia de temperatura, que instantáneamente la transforma en una señal analógica o digital para su posterior análisis de medición.



**Figura 1.3.** Piranómetro del tipo termoeléctrico

Por lo general, las principales partes de un piranómetro son: el sensor, difusor, el domo de vidrio y el cuerpo del piranómetro [4, p. 4], [8, p. 14]. En la Figura 1.4, se observa partes más detalladas de este instrumento.



**Figura 1.4.** Partes de un piranómetro [8, p. 14]

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los radiómetros entre ellos el piranómetro, mandan una señal analógica o digital. Por ejemplo, el piranómetro de la Figura 1.3 manda una señal analógica diferencial en la escala de los milivoltios (mV). Esta señal posteriormente es leída y registrada por medio un multímetro digital o data logger.

Estos dispositivos registradores pueden convertir directamente la señal eléctrica de los instrumentos en irradiancia usando la Ecuación 1.2, especificada en los manuales de usuario de los instrumentos [8], [9].

$$I = \frac{V}{S}$$

**Ecuación 1.2.** Ecuación que transforma la señal eléctrica en irradiancia [8], [9]

Donde:

- $I$  es la irradiancia solar ( $W/m^2$ ).
- $V$  es la señal eléctrica de voltaje (mV).
- $S$  es la sensibilidad o factor de calibración del piranómetro ( $\mu V/W \cdot m^{-2}$ ).

Con la finalidad de tener mayor comodidad al realizar la operación de conversión, se modifica la sensibilidad por su inversa  $S^{-1}$ . El orden de sus unidades cambia de ( $\mu V/W \cdot m^{-2}$ ) a ( $W \cdot m^{-2}/\mu V$ ). Además, la mayoría de data loggers leen señales que van en el orden de los milivoltios (mV), por lo que se suele cambiar de microvoltios a milivoltios, teniendo las siguientes unidades ( $W \cdot m^{-2}/mV$ ).

Al final, se obtiene Ecuación 1.2 expresada de la siguiente forma.

$$I = V * S^{-1} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

**Ecuación 1.2.** Ecuación que transforma la señal eléctrica en irradiancia [8], [9]

**1.4.1.4 Tipos de piranómetros y su clasificación**

Los tipos más comunes de piranómetros son: “termoeléctricos” y “fotoeléctricos”. Los piranómetros termoeléctricos están constituidos por una termopila, que mide la radiación solar a causa de una diferencia de temperatura entre la superficie receptora (activa) y el cuerpo (pasiva), la cual inmediatamente se transformada en una señal eléctrica analógica o digital. Por el contrario, los piranómetros fotoeléctricos poseen un receptor fotoeléctrico que utiliza fotodiodo de silicio o una célula fotovoltaica, para captar la radiación solar y convertirla en una señal eléctrica [4, p. 4].

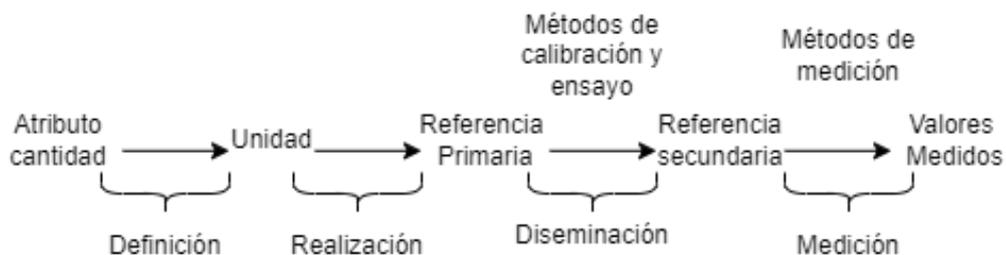
La norma ISO 9060 clasifica a los piranómetros dependiendo del grado de precisión de los instrumentos. Esta clasificación se la divide con letras A, B y C. La letra A o también llamada Secondary Standard se atribuye a los piranómetros con un mayor grado de precisión, como los piranómetros patrón o de referencia. Mientras que, las letras B (First Class) Y C (Second Class), poseen menor grado de precisión y se las asigna a los piranómetros que realizan mediciones solares en el campo [4, pp. 4-5].

Adicionalmente, según la norma ISO 9847, los piranómetros se pueden dividir acorde a la tarea que desempeñan, por ejemplo; un piranómetro que es utilizado para la toma de

mediciones a largo plazo y al aire libre se lo conoce como piranómetro de campo. Estos instrumentos suelen descalibrarse debido a su exposición continua y excesiva a factores ambientales, como; la humedad, viento, calor, etc. Mientras que, los piranómetros que son utilizados para calibrar piranómetros de clases inferiores se los conoce como de referencia o patrón, por lo general suelen estar en buenas condiciones y son exclusivos para el proceso de calibración. Por último, los piranómetros que se encuentran en proceso a ser calibrados, se los conoce como de prueba [5, p. 2].

#### 1.4.1.5 Metrología

Según el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología), la metrología es la ciencia que abarca todas las actividades relacionadas con la medición, ya sea en estudios experimentales o teóricos en todo ámbito tecnológico o científico [10, p. 9]. Todas las formas de medición intervienen directamente en nuestra vida cotidiana, como en la medición del tiempo para la cocción de un alimento o en la estimación de radiación UV para la prevención y cuidado de la piel.



**Figura 1.5.** Cadena secuencial de estándares, cantidades y medición [10, p. 10]

En la Figura 1.5, se resume en un diagrama la secuencia que interpreta una conexión secuencial entre las mediciones, cantidades y estándares, con el propósito de exponer una lógica coherente entre un valor medido y una propiedad en sistemas estandarizados [10, p. 10].

#### 1.4.1.6 Definición del estándar y tipos de patrones de medición

En metrología, el término “estándar” se lo comprende en dos conceptos totalmente distintos. El primero se relaciona con la normalización, que son lineamientos que garantizan la seguridad y calidad de un determinado proceso. Por otro lado, el segundo concepto se lo atribuye a un patrón, el cual abarca la referencia en un sistema de medición. Según el VIM, el patrón se lo define como la medición materializada en un instrumento para ser usada como referencia [10, p. 10].

Según A. E. Esquivel [10, p. 12], existen dos tipos de patrones de medición, entre ellos el patrón primario. Este patrón es designado y ampliamente acreditado por instituciones u

organizaciones que promueven la metrología legal. Además, se caracteriza por sus altas cualidades metrológicas sin ser referenciados con otros patrones con la misma magnitud. Por otro lado, el patrón secundario es un estándar que posee los mismo valores de medición obtenidos al compararlo con el patrón primario, pero es utilizado para realizar comparaciones en la medición cuando no es práctico usar directamente el patrón primario.

#### 1.4.1.7 Precisión y exactitud

La precisión es la cercanía entre mediciones realizadas bajo las mismas condiciones. Y la exactitud, es la proximidad entre un resultado medido y el valor real de una medición [10, p. 19].

#### 1.4.1.8 Cadena de trazabilidad mundial

La trazabilidad es la propiedad del resultado de una medición, que puede ser vinculada a una referencia nacional, regional o internacional, por medio de una cadena continua de comparaciones, teniendo en cuenta cierto grado de incertidumbres [10, p. 12].

La cadena de trazabilidad mundial es una secuencia continua que se la compara con un patrón. Esta cadena puede ser representada mediante una pirámide jerárquica de mayor a menor orden, como se aprecia en la Figura 1.6 [10, p. 12].



**Figura 1.6.** Pirámide jerárquica de trazabilidad mundial.

En el primer nivel se encuentra el valor real conformado de organismos e instituciones mundiales que promueven la fiabilidad y precisión de cualquier práctica vinculada a la medición. Estos organismos son: El BIPM (Oficina Internacional de Pesas y Medidas),

CGPM (Conferencia General de Pesas y Medidas), OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) [10, p. 15], [11]. El objetivo principal de estas organizaciones es ser una base sólida para la colaboración investigativa y de desarrollo tecnológico de sus estados miembro, brindando capacitaciones y comparaciones en la medición con varios instrumentos patrones internacionales, acogiéndose a los lineamientos de la metrología legal [12].

En segundo nivel se encuentra los laboratorios de instituciones internacionales como: SIM (Sistema Interamericano de Metrología), APMP (El Programa de Metrología de Asia-Pacífico), COOMET (Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions), EURAMET (La Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología) [11]. Estos laboratorios forjan y fomentan convenios a nivel internacional y/o regional relacionados a la captación de mediciones precisas, exactas y trazables para sus países miembro, estimulando la transferencia de conocimientos y servicios tecnológicos, mejorando la confiabilidad de los estándares internacionales o regionales [11].

En el tercer nivel se encuentran los laboratorios de organizaciones nacionales como: INEN-Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Normalización), CENAM - México (Centro Nacional de Metrología), INTI - Argentina (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), entre otros más [13],[14],[15]. Estas organizaciones acogen la referencia del patrón internacional y/o regional, adaptándola a la referencia nacional en la escala del Sistema Internacional (SI), empleando una amplia gama de patrones nacionales que garanticen la precisión y confiabilidad de las mediciones a nivel nacional [16].

En el cuarto nivel se ubican los laboratorios de instituciones públicas o privadas, que se encuentran acreditadas por un ente de acreditación nacional, como el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) o por normas internacionales como la ISO/IEC 17025 [16]. Estos laboratorios ofrecen la calibración de instrumentos con sus patrones trazables a la referencia nacional. En Ecuador existen dos categorías de laboratorios, la primera llamada REM-LND (Red Ecuatoriana de Metrología de Laboratorios Nacionales Designados), que está conformada por dos laboratorios, entre ellos El Laboratorio del Centro de Metrología del Ejercito Ecuatoriano (CMEE) [17], [18]. Por otro lado, la segunda categoría llamada REM-LSC (Red Ecuatoriana de Metrología de Laboratorios Secundarios de Calibración), está conformada por diecinueve laboratorios en total, donde se encuentran laboratorios como; VERIPET, CERTMETROL, entre otros más [17], [19].

En el último nivel, se encuentran los usuarios que requieren el servicio de calibración de sus instrumentos, con el fin de tener mediciones precisas y trazables a la cadena de trazabilidad mundial.

#### **1.4.2 Calibración de piranómetros**

La calibración de instrumentos de medición se la define como las relaciones de ajuste y adaptación entre valores medidos por el instrumento y la magnitud física del instrumento de referencia en ciertas condiciones [10, p. 135]. En Ecuador, existen varios laboratorios que realizan certificados de calibración de instrumentos de medición, que miden: longitud, masa, volumen, densidad, temperatura, humedad, energía, potencia, presión y fuerza [13].

Actualmente, en Ecuador no existe una institución u organización que realice certificaciones de calibración de piranómetros. En cierto grado, la carencia de estas certificaciones impacta significativamente al desarrollo tecnológico e investigativo del país, puesto que la radiación solar es un elemento cotidiano en nuestra vida, la cual tendrá que ser aprovechar a mayor profundidad para sus aplicaciones energéticas y de prevención en la salud pública.

A nivel internacional y regional existen varios grupos, laboratorios y empresas, que realizan el servicio de certificación en la calibración de instrumentos que miden radiación solar, como por ejemplo; El Grupo de Investigación Antártica de la Universidad de Santiago de Chile, EKO - instruments (Japón); Kipp and Zonen (Países Bajos), etc. Los laboratorios de estas organizaciones o empresas llevan la calibración de sus instrumentos trazables a la WRR (World Radiation Reference), y siguen procedimientos de calibración guiados principalmente por las normas internacionales ISO 9846 y 9847 [20], [21], [22].

##### **1.4.2.1 Trazabilidad de piranómetros de referencia**

Los laboratorios internacionales como EKO-instruments que realiza la calibración y fabricación de estos instrumentos, llevan el registro de sus calibraciones trazables a la WRR por JEMIC (Japan Electronic Meters Inspection Cooperation). Cada determinado periodo de tiempo, los piranómetros de referencia son calibrados por un pirheliómetro de cavidad absoluta en conjunto con otras unidades que forman parte de la instrumentación de referencia [8, p. 35].

Además, el pirheliómetro de referencia de cavidad absoluta es monitoreado y calibrado cada cinco años con la WRR, que lleva los estándares primarios en PMOD (Davos, Suiza). Adicionalmente, cada año la escala de cavidad absoluta de estos instrumentos patrón se

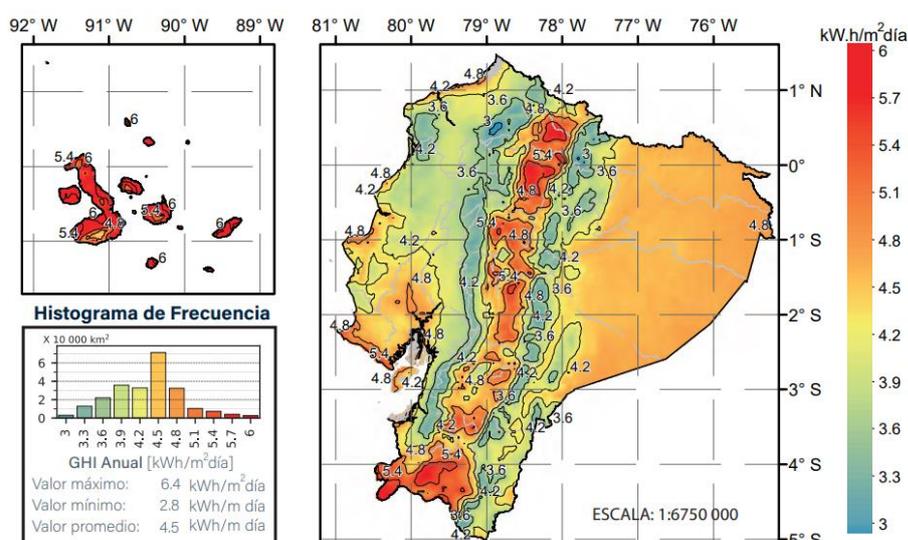
los examina durante el NPC (National Pyranometer Comparisons) en NREL (National Renewable Energy Laboratory) en Estados Unidos [8, p. 35].

#### 1.4.2.2 Importancia de la calibración de los piranómetros

A continuación, en los siguientes puntos se exponen de manera resumida algunos casos de estudio y aplicaciones relacionadas a la energía solar para conocer su impacto e importancia actualmente.

- **Mapa Solar:** El estudio de la radiación directa y difusa del sol, serán útiles para la elaboración de un mapa solar actualizado, en el cual se verifica y observa las zonas o sectores con mayor incidencia de radiación solar, para aplicaciones posteriores.

Gracias a anteriores estudios, se ha comprobado que en Ecuador el 75 % de su territorio tiene altos niveles de irradiación solar global, por encima de un valor sugerido de 3,8 kWh/m<sup>2</sup> para la implementación de tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas [2, pp. 9-10].



**Figura 1.7.** Mapa de GHI en Ecuador (kWh/m<sup>2</sup>·día)[2, p. 12]

Adicionalmente, en la Figura 1.7 se observa que las provincias con mayor incidencia de GHI en Ecuador son; Pichincha, Loja, Imbabura, Cotopaxi y Galápagos [2, p. 10].

- **Implementación de paneles fotovoltaicos:** Para aprovechar el potencial solar que existe en una determinada zona, se utiliza paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica.

El principio de funcionamiento de estos paneles es capturar la energía solar en células fotovoltaicas y transformarlas en energía eléctrica (DC), mediante el efecto fotovoltaico [23].

Adicionalmente, estos sistemas están conformados por un controlador y/o inversor eléctrico (DC/AC) que distribuye la energía eléctrica hacia la red o hacia las baterías [23].

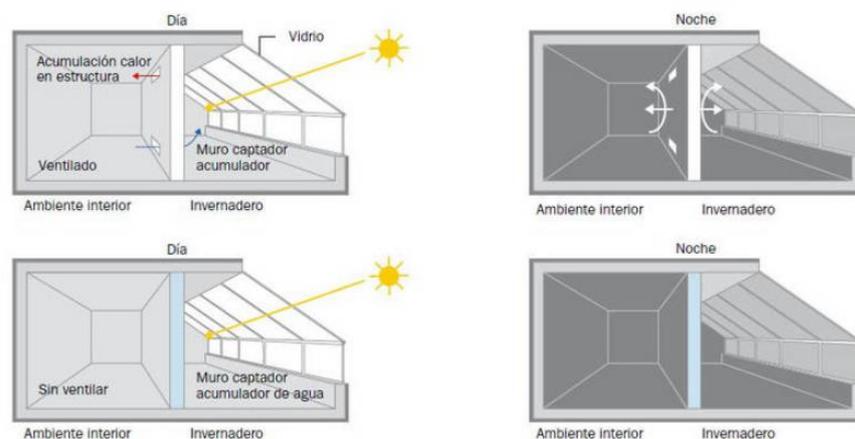


**Figura 1.8.** Panel fotovoltaico de dos ejes.

En la Figura 1.8, se puede apreciar un panel fotovoltaico de dos ejes, el cual fue diseñado para el seguimiento de los rayos solares a lo largo de todo el día.

- **Diseño de sistemas pasivos de calefacción solar:** Es una estrategia que capta y retiene la energía térmica solar para la calefacción de edificaciones [24].

El objetivo principal de estas estrategias de diseño es no depender de aparatos electrónicos para calentar viviendas. Sin embargo, están sujetas al diseño, implementación de nuevos materiales y la correcta orientación para una mejor captación de energía solar [24], [25].

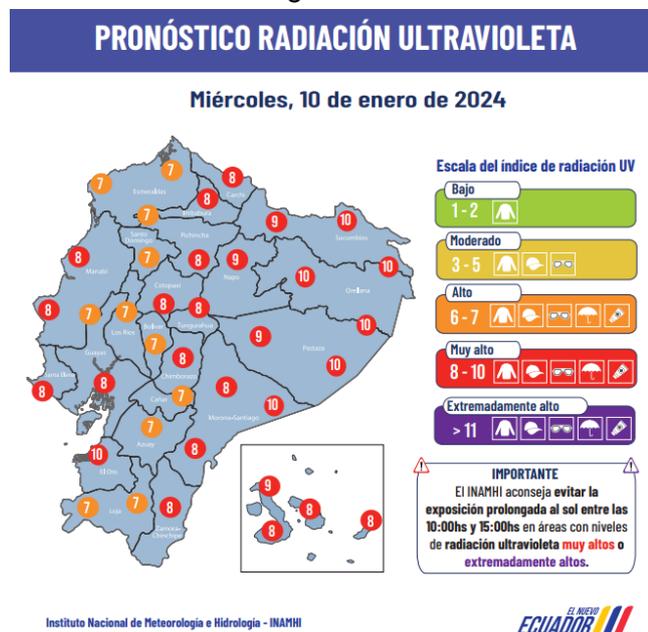


**Figura 1.9.** Diseño de sistemas pasivos de calefacción solar[25]

- **Aplicaciones meteorológicas enfocadas en la estimación de radiación UV:** En primera instancia, la meteorología es la ciencia que predice, estudia y observa el tiempo y las variables climatológicas de una determinada región en un lapso de tiempo determinado [26].

En Ecuador la institución encargada de analizar y distribuir la información hidrometeorológica es el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), que a su vez es miembro de la OMM (Organización Mundial de Meteorología), encargada de promover y regular lineamientos e información relacionada al tiempo y al clima de sus estados miembro [27].

Generalmente, el INAMHI usa estos instrumentos para varias aplicaciones, entre ellas, la medición de radiación UV. Se sabe por estudios anteriores, que la radiación solar puede ayudar en la estimulación de producción de vitamina D en la piel, o causar daños como el cáncer y el envejecimiento prematuro [28]. Por lo que su cuantificación es de gran relevancia.



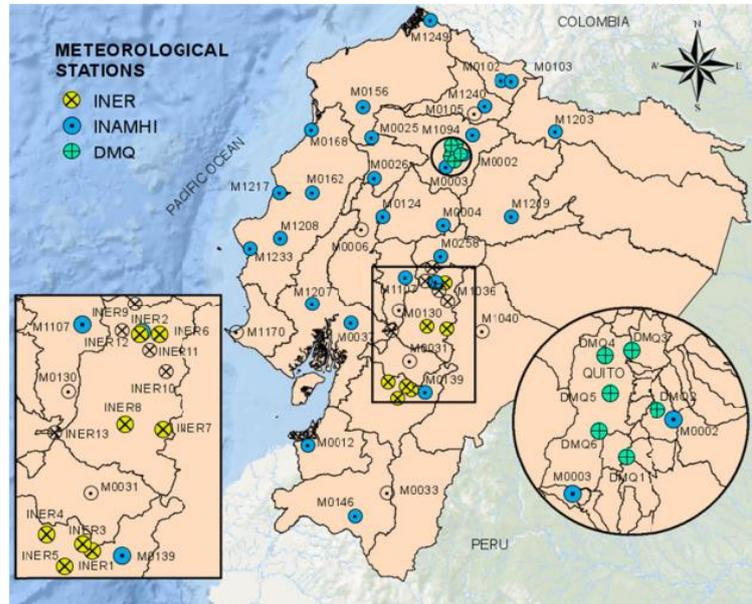
**Figura 1.10.** Pronóstico radiación ultravioleta[30]

En la Figura 1.10, extraída del sitio oficial del INAMHI, se evidencia un índice de radiación UV muy alto en la mayoría de las provincias del Ecuador, indicando en el día específico de estudio, la prevención y cuidado de la piel [28], [29], [30].

#### 1.4.2.3 Estaciones meteorológicas ecuatorianas que miden radiación solar

Varias instituciones gubernamentales en Ecuador han implementado estaciones para medir variables meteorológicas, entre ellas la irradiación global horizontal (GHI). Estos organismo son; El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Secretaría de Medio Ambiente del Municipio de Quito (DMQ) y el Instituto Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética (INER), llamada así anteriormente [31, p. 64].

En la Figura 1.11, se observa que a largo del territorio ecuatoriano se encuentran cincuenta y tres estaciones meteorológicas pertenecientes a las instituciones anteriormente mencionadas. Es preciso recalcar que, en el mapa no se encuentran todas las estaciones meteorológicas del territorio ecuatoriano, ya que no se conoce su ubicación exacta [31, p. 68].



**Figura 1.11.** Ubicación de estaciones meteorológicas en Ecuador[31, p. 65]

#### 1.4.2.4 Aplicación de la Norma ISO 9847 para la calibración de piranómetros

La norma ISO es una organización no gubernamental de carácter internacional e independiente, que cuenta con 169 organismos nacionales de normalización. El propósito de esta normativa es implementar soluciones que garanticen la seguridad y calidad al momento de afrontar problemas que presentan ser un desafío tecnológico e investigativo a nivel mundial [5], [32].

La razón de usar la norma ISO 9847 para calibración piranómetros, es debido a su gran base de conocimientos de carácter internacional, que está sujeta a constantes revisiones y cambios por expertos en el tema, brindado confiabilidad y precisión a la hora de realizar el proceso de calibración de los piranómetros. La mayoría de los laboratorios internacionales que realizan la calibración de estos instrumentos, cuentan con esta guía confiable de calibración, la cual ha sido revisada y aprobada desde 1992, y que actualmente se encuentra en una etapa de aprobación [33].

Adicionalmente, los laboratorios de carácter internacional, regional y nacional no solo cuentan con esta norma para la calibración de piranómetros, también recurren a ISO 9846,

que está enfocada a realizar la calibración de un piranómetro de campo utilizando un pirheliómetro de referencia, o a la norma la ASTM E0824, que de igual forma se centra en la calibración de radiómetros pero siguiendo los lineamientos descritos en la norma ISO 9847 [32], [34], [35], [36].

## **2. METODOLOGÍA**

Esta parte del TIC estará compuesta por tres pilares fundamentales necesarios para el desarrollo del proceso de calibración y la elaboración del manual. El primer pilar llamado “Interpretación la norma ISO 9847”, resumirá y extraerá las principales recomendaciones para realizar el procedimiento de calibración. El segundo pilar designado como “Experimentación y Tratamiento Matemático”, abordará la instalación de los piranómetros para su proceso de calibración, como también el tratamiento matemático para encontrar el factor de calibración final de dicho instrumento. Por último, el tercer pilar denominado “Elaboración del manual de calibración” especificará de manera resumida, las principales componentes que tendrá el manual, según el desarrollo experimental elaborado en el segundo pilar y los lineamientos descritos en la norma.

### **2.1 Interpretación de la norma ISO 9847**

La norma ISO 9847 es una norma de carácter internacional que establece los procedimientos y requerimientos necesarios para la calibración de piranómetros de campo, utilizando como referencia un piranómetro patrón. El objetivo de esta norma es garantizar de manera confiable la precisión y la trazabilidad en la toma de mediciones de radiación solar, para su posterior uso en diversas aplicaciones relacionadas con esta energía [5].

Esta norma presenta dos métodos de calibración de piranómetros de campo. El primer método llamado en exteriores (tipo I), usa la radiación solar de un determinado sitio como fuente de energía de calibración. Mientras que, el segundo método denominado en interiores (tipo II), emplea una fuente de radiación artificial parecida a la del sol para realizar el proceso de calibración [5, p. 1].

Para el método en exteriores (tipo I), se puede calibrar los piranómetros en varias posiciones, por ejemplo; en una posición horizontal (tipo Ia), con un ángulo de inclinación de cero grados respecto a la horizontal, en una posición con un ángulo de inclinación (tipo Ib), o en una posición con un ángulo en incidencia normal (tipo Ic) [5, p. 1].

El segundo método de calibración en interiores (tipo II), ofrece calibrar a los piranómetros empleando una lampara sombra (tipo IIa), o sin sombra (tipo IIb), o con un ángulo en incidencia normal (tipo IIc). Los tipos IIa y IIb se asemejan a realizar el proceso de calibración con el método en exteriores en condiciones de cielo nublado y sin nubes, respectivamente. Mientras que, el método tipo IIc se asemeja a realizar el procedimiento de calibración con un ángulo en incidencia normal del tipo Ic [5, p. 1].

Es importante mencionar que, esta normativa establece que cualquier piranómetro que haya sido usado para la recolección de datos, puede ser calibrado con cualquiera de los métodos descritos anteriormente. En otras palabras, se puede calibrar cualquier piranómetro independientemente del tipo de sensor que utilice, con la condición de que el piranómetro de referencia sea del mismo tipo y calibrado con la misma inclinación del piranómetro de prueba [5, p. 1].

Este trabajo está enfocado en la calibración en exteriores sobre una superficie horizontal (tipo Ia), ya que el grupo de investigación en energías alternativas (SCINERGY), auspiciante de este proyecto, cuenta con los equipos para esto.

### **2.1.1 Instalación de los instrumentos para la calibración en exteriores (tipo I).**

En la norma establece que antes de iniciar el proceso de calibración, es importante conocer la compatibilidad de los piranómetros con el data logger o multímetro digital. Además, se tiene escoger el lugar de calibración para que ningún objeto a su alrededor provoque sombra o interrumpa con la calibración del instrumento [5, pp. 1-2].

Posteriormente, se instalan y orientan a los piranómetros en una mesa de calibración común, al aire libre y ajustando la inclinación de la mesa dependiendo del método de calibración usado. Después, se tiene que verificar: el tipo de señal de los piranómetros, continuidad eléctrica de los cables, polaridad, intensidad y estabilidad de la señal de cada instrumento [5, p. 3].

Una vez que se ha verificado estas recomendaciones, se procede a conectar los cables de señal de los piranómetros al data logger.

### **2.1.2 Calibración Horizontal (tipo Ia)**

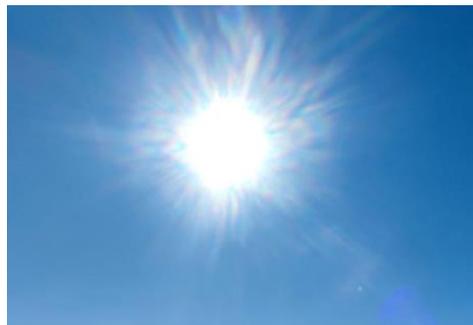
Este método de calibración presenta tres tipos de condiciones de cielo, las cuales varían en la recolección de datos según la condición establecida.

#### **2.1.2.1 Condiciones de cielo sin nubes y estable**

Estas condiciones se dan cuando no existe la presencia de nubes alrededor del sol, o la Irradiancia Normal Directa (DNI) ocupa el 80 % de la Irradiancia Global Horizontal (GHI). La norma sugiere, si la recolección de datos se la realiza de manera automática utilizando un data logger, el criterio anterior se lo reemplaza observando un valor mínimo de irradiancia que indique la presencia de nubosidad alrededor del sol [5, p. 3].

Debido a esto, se recolecta simultáneamente mediciones instantáneas de señal eléctrica para ambos piranómetros, el patrón y el de prueba, de manera continua, durante quince series de medición como mínimo, que duren entre diez a veinte minutos. Además, cada serie de medición debe de tener más de veintiuna mediciones instantáneas de señal [5, p. 3].

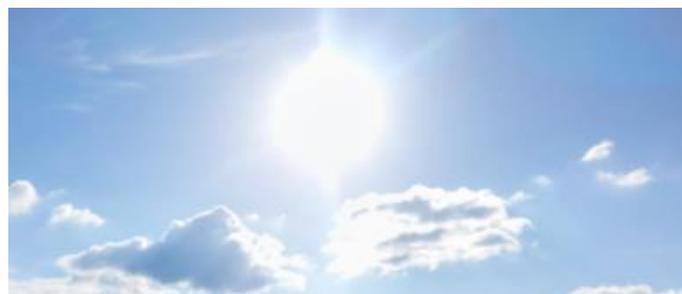
La toma de mediciones tiene que realizarse durante un periodo mínimo de dos a tres días, desde las primeras horas en la mañana hasta la tarde, para así obtener una amplia gama de datos [5, p. 3]. En la Figura 2.1, se observa un ejemplo de estas condiciones de cielo.



**Figura 2.1.** Condiciones de cielo  
sin nubes y estable

#### **2.1.2.2 Condiciones de cielo con algunas nubes e inestable**

Estas condiciones ocurren cuando las nubes se encuentran a 30 grados alrededor del sol. Por esta razón, se recolectan simultáneamente mediciones instantáneas de señal en los dos instrumentos de manera ininterrumpida, en intervalos que duren entre uno a cinco minutos, desde la mañana hasta el atardecer, en un mínimo de cinco días e incluso hasta dos semanas. Se tiene que elegir correctamente el periodo de tiempo para obtener como mínimo, quince series de medición integradas con más de veintiuna mediciones instantáneas de señal en cada instrumento [5, p. 3]. En la Figura 2.2, se observa este tipo de condiciones de cielo.



**Figura 2.2.** Condiciones de cielo con algunas  
nubes e inestable

### **2.1.2.3 Condiciones de cielo nublado**

Para condiciones de cielo nublado, se deben tomar mediciones instantáneas de señal de forma simultánea, integradas en cincuenta o más series de medición en intervalos de una hora para los dos piranómetros. Además, las series de medición horarias se las recolecta en un mínimo de diez días, en distintas horas del día y diferentes tipos de nubosidad, verificando que la irradiancia solar global media (GHI) sea superior a  $100 \text{ W/m}^2$  [5, p. 3]. En la Figura 2.3, se presenta estas condiciones de cielo.



**Figura 2.3.** Condiciones de cielo nublado e inestable

### **2.1.3 Calibración en Inclinación (tipo Ib)**

La calibración con un ángulo de inclinación se la realiza solo en condiciones de cielo despejado, recolectando mediciones en función de las condiciones de cielo sin nubes y estable del tipo Ia [5, pp. 3-4].

### **2.1.4 Calibración en incidencia normal (tipo Ic)**

Para la calibración tipo Ic, se recolecta como mínimo quince series de mediciones entre diez a veinte minutos, que consten con más veintiuna lecturas instantáneas de señal tomadas alrededor del mediodía. Adicionalmente, se tiene que asegura que todas las mediciones sean tomadas cuando la irradiancia solar directa (DNI) sea superior a  $600 \text{ W/m}^2$  [5, p. 4]

### **2.1.5 Método de calibración utilizado**

Una vez interpretada la norma ISO 9847, el método de calibración usado acorde a los equipos e instrumentos de la estación meteorológica de la EPN es el tipo Ia. Además, para comparar el método de calibración en distintas condiciones de cielo, se realizó dos procesos de calibración. El primer en condiciones de cielo nublado e inestable y el segundo en condiciones de cielo sin nubes y estable.

## **2.2 Experimentación y Tratamiento matemático**

La instalación y tratamiento matemático para realizar el proceso de calibración, se encuentra esquematizado en diez pasos. Es importante mencionar que, estos pasos serán los mismos para los dos procesos de calibración, tan solo variando en la recolección de datos, debido a que dependen de las condiciones de cielo establecidas anteriormente.

### **2.2.1 Instalación de instrumentos para su calibración con el método (tipo Ia)**

Los equipos que se utilizaron para realizar el proceso de calibración son; un piranómetro de referencia EKO MS 80 (Clase A), un piranómetro de prueba EKO MS 40 (Clase C) y un Data Logger (FieldLogger Novus). Se conoce de ante mano, que los piranómetros son del mismo tipo, es decir son “termoeléctricos” y fueron calibrados de fábrica con el método en interiores (tipo IIc) según la norma ISO/IEC 9847.

Antes de realizar el procedimiento de calibración, la norma sugiere conocer la compatibilidad de los piranómetros con el data logger. Por lo tanto, se verificó las características de la lectura de los instrumentos y la resolución del data logger, tomando en cuenta la precisión en la lectura de señal eléctrica. Se conoce que los instrumentos mandan una señal eléctrica de voltaje en un rango de (0 a 20 mV), que son compatibles con las entradas analógicas que posee el FieldLogger Novus. Además, estas entradas tienen una resolución de conversión A/D de 24 bits, que es capaz de leer y capturar señales muy pequeñas como la de los piranómetros.

Después de comprobar la compatibilidad de los equipos, se procede a realizar la instalación para el proceso de calibración, esquematizo en los siguiente pasos.

#### **2.2.1.1 Paso 1: Verificar el entorno del proceso de calibración.**

El lugar que se escogió para realizar el proceso de calibración es la estación meteorológica del grupo de investigación Scinergy, ubicada en la terraza del edificio de Química y Electrónica de la EPN. Este lugar es de acceso restringido, es decir, no existe interferencia de terceros que pongan en riesgo el proceso de calibración. Además, la mesa de calibración se ubicó en una posición estratégica donde no exista objetos que provoquen sombra.

#### **2.2.1.2 Paso 2: Colocar los piranómetros en la mesa de calibración.**

En la Figura 2.4, se observa la instalación de los piranómetros en la mesa de calibración común. Estos instrumentos deben estar correctamente nivelados y orientados hacia el ecuador o a cualquier polo cercano como sugiere la norma.



**Figura 2.4.** Instalación de piranómetros en la mesa de calibración común al aire libre

### 2.2.1.3 Paso 3: Revisar la polaridad de señal de los piranómetros, continuidad eléctrica de los cables, la intensidad y estabilidad de señal.

Para conocer la polaridad de señal de los piranómetros, se recurre al manual de usuario de cada instrumento. Sabiendo esto, para el piranómetro de referencia MS 80, el cable de color marrón es el positivo (+) y el de color blanco el negativo (-). Por otro lado, para el piranómetro de prueba MS 40, el cable de color blanco es el positivo (+) y el de color negro el negativo (-), tal como se observa en las Figuras 2.5 y 2.6.

No.	Cable Color		MS-80
	MS-80	MS-80U	
1.	Brown	Red	mV [+]
2.	White	White	mV [-]

**Figura 2.5.** Polaridad del piranómetro MS 80[8]

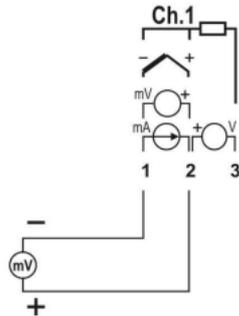
No.	Cable Color	MS-40
1.	White	mV [+]
2.	Black	mV [-]

**Figura 2.6.** Polaridad del piranómetro MS 40[9]

Por otro lado, para conocer la intensidad de señal en los cables de los piranómetros, se recomienda usar un multímetro en la opción de lectura de voltaje. De igual forma, se utiliza el mismo instrumento para verificar la continuidad eléctrica de los cables, y así descartar si un cable de señal se encuentra roto o dañado.

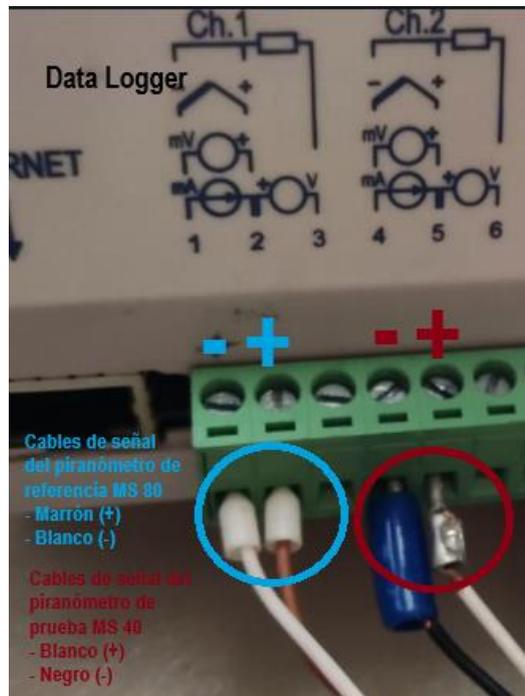
#### 2.2.1.4 Paso 4: Conectar los cables de señal a las entradas del Data Logger.

El manual de usuario del data logger especifica que la entrada número uno es la positiva (+) y la entrada número dos la negativa (-), tal como se observa en la Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Polaridad de las entradas analógicas del Data Logger Novus[37]

Conociendo la polaridad de señal del dispositivo, se procede a conectar los cables de los piranómetros a las entradas del data logger, como en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Conexión de cables de señal a las entradas del Data Logger

### 2.2.1.5 Paso 5: Realizar la configuración para el registro de datos en el software del Data Logger.

La configuración para el registro de datos en el Data Logger, sigue la secuencia lógica descrita en la Figura 2.9. Cabe mencionar, que la mayoría de estos dispositivos siguen la misma lógica de configuración.



Figura 2.9. Secuencia lógica para configurar un Data Logger

En los siguientes puntos, se detalla la configuración realizada en el data logger para el registro de datos según las condiciones de cielo del proceso.

- **Crear un archivo registrador**

Para comenzar, en el software del data logger llamado “Configuración FieldLogger Novus” se crea un nuevo archivo de configuración con el nombre de la tarea a desarrollar.



Figura 2.10. Nuevo archivo de configuración

- **Configurar las entradas de lectura de señal**

Luego, se configuran los canales de señal del data logger colocando: el nombre del sensor, tipo de señal del instrumento, el rango de medición, los decimales en la medida y la conversión de milivoltios (mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ), como se observa en la Figura 2.11.

**Figura 2.11.** Configuración de canales analógicos

Para realizar la conversión de milivoltios a irradiancia, se accede al apartado de calibración customizada, tal como se muestran en la Figura 2.12. En esta opción, se observan dos columnas, la primera llamada “Valor padrón” y la segunda “Indicación del Field Logger”. En la columna de Valor padrón, se ingresa los valores de los puntos iniciales y finales correspondiente a la irradiancia solar. Mientras que, en la columna de Indicación del Field Logger se ingresa los puntos iniciales y finales del rango de lectura del piranómetro en milivoltios.

Por ejemplo, el punto 1 del “Valor padrón” corresponde al valor mínimo de irradiancia a 0 milivoltios, es decir 0 W/m<sup>2</sup>. Para el punto 2, se coloca el valor máximo de irradiancia a 20 milivoltios, que corresponde 1908,39 W/m<sup>2</sup>. Esta conversión de irradiancia se la realiza con la Ecuación 1.2, utilizando la sensibilidad del piranómetro de referencia (MS 80) de 10,48 (μV/W·m<sup>-2</sup>) o 95,42 (W/m<sup>2</sup>·mV).

#	Valor del Padrón	Indicación del FieldLogger
1	0.000000	0.000000
2	1908.396973	20.000000

**Figura 2.12.** Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia (W/m<sup>2</sup>) para el sensor MS 80

De manera similar, se realiza la configuración para el piranómetro de prueba (MS 40), pero utilizando la sensibilidad correspondiente a este instrumento, la cual es 12,37 ( $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) o 80,84 ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{mV}$ ).

#	Valor del Padrón	Indicación del FieldLogger
1	0.000000	0.000000
2	1616.814819	20.000000

**Figura 2.13.** Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) para el sensor MS 40

- **Configurar el registro de las mediciones**

Después, se establece la configuración de la lectura y registro de las mediciones en intervalos de tiempo acorde a la tarea a realizar. En este caso, para obtener más de veintiuna lecturas instantáneas de medición, se configura el intervalo de registro para guardar datos cada 5 segundos, tal como se aprecia en la Figura 2.14.

**Figura 2.14.** Configuración para el registro de mediciones para los dos piranómetros

- **Enviar la nueva configuración al data logger**

Una vez terminada la configuración de registro, se envía la nueva configuración a la memoria interna del dispositivo.



**Figura 2.15.** Envío de la nueva configuración al Data Logger

- **Realizar un diagnóstico de configuración**

Finalmente, acorde a la Figura 2.16 se puede observar si existe algún problema con la configuración del dispositivo para corregirla. Por otro lado, en la sección de gráficos de la Figura 2.17, el dispositivo muestra en tiempo real, la toma de datos de los piranómetros, donde se puede observar un desajuste en la medida del piranómetro de prueba (MS 40) respecto a la medida de referencia del piranómetro patrón (MS 80).



**Figura 2.16.** Configuración de diagnóstico general



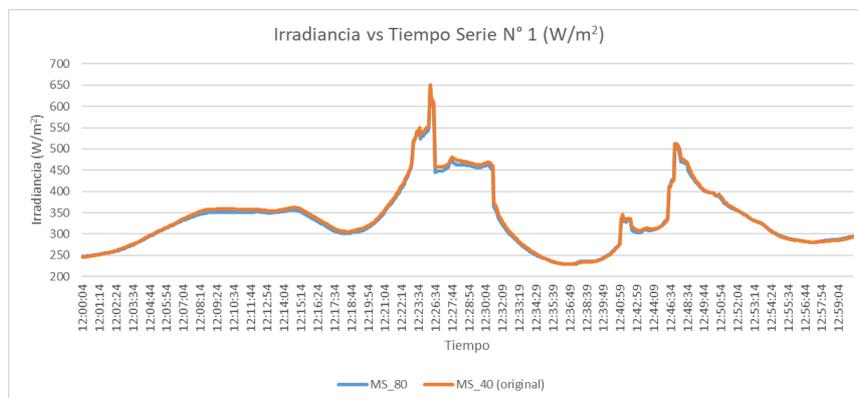
**Figura 2.17.** Diagnóstico de irradiancia respecto al tiempo.

### 2.2.1.6 Paso 6: Recolectar datos acorde a las condiciones de cielo.

Como se mencionó anteriormente, se realizó dos procesos de calibración, los cuales se diferencian por las condiciones de cielo establecidas.

En el primer proceso, en condiciones de cielo nublado e inestable, se obtuvieron 51 series de mediciones horarias con 720 mediciones instantáneas de señal para ambos instrumentos, en un periodo de 11 días tal como recomienda la norma.

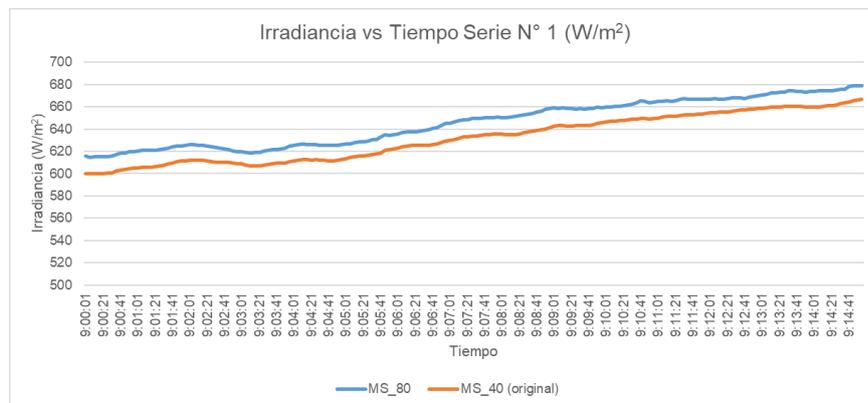
A lo largo de los 11 días, se observó condiciones de cielo nublado con diferentes tipos de nubosidad. En la Figura 2.18, se puede observar como la irradiancia cambia bruscamente formando picos a lo largo de la serie horaria, estas variaciones son indicadores sólidos de la presencia de nubes alrededor del sol.



**Figura 2.18.** Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo nublado e inestable

Por otro lado, en el segundo proceso en condiciones de cielo sin nubes y estable, se recolectó 15 series de medición en un lapso de 15 minutos con 180 mediciones instantáneas en ambos piranómetros, en un periodo de 3 días.

A lo largo de estos tres días, no se observó ninguna nube alrededor del sol. Una manera simple de verificar estas condiciones es analizar el comportamiento de la irradiancia respecto al tiempo. Por ejemplo, en condiciones de cielo sin nubes y estable, la irradiancia solar no varía de manera rápida e inesperada, tal como se observa en la Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo sin nubes y estable

Una vez que se obtuvieron estos datos, se extrae de la memoria interna del data logger el registro de las mediciones. Por lo general, este registro viene en un formato csv, con la siguiente información distribuida en columnas: fecha, hora e irradiancia solar instantánea de los dos piranómetros.

Posteriormente, con esta información se crea una tabla de distribución horaria en una hoja de cálculo de Excel, para observar el comportamiento de la irradiancia y ordenarla por lapsos de tiempo establecidos por las condiciones de cielo. Además, se convierte las mediciones instantáneas de irradiancia en señales instantáneas de voltaje con la Ecuación 1.2, para su posterior análisis en el tratamiento matemático.

En la Figura 2.20, se muestra un ejemplo de la tabla de distribución horaria.

Fecha	time	GHI_MS80 (W/m2)	GHI_MS40 (W/m2)	MS80_GHI (mV)	MS40_GHI(mV)
6/1/2024	9:00:01	615,667	600,259	6,4521902	7,42520383
6/1/2024	9:00:06	614,7299	599,9462	6,4423694	7,421334494
6/1/2024	9:00:11	614,9835	599,7865	6,4450271	7,419359005
6/1/2024	9:00:16	615,3738	599,8586	6,4491174	7,420250882

**Figura 2.20.** Tabla de distribución horaria

### **2.2.2 Tratamiento matemático para encontrar el factor de calibración del piranómetro de prueba**

Es relevante destacar, el tratamiento matemático especificado en la norma sirve para todos los métodos de calibración (tipo I) y para cualquier condición de cielo.

Este tratamiento matemático, está dividido en cuatro pasos que son complementarios con los seis pasos anteriores. Para mayor detalle de este tratamiento, revisar el ANEXO II a partir del punto “TRATAMIENTO MATEMÁTICO”

#### **2.2.2.1 Paso 7: Encontrar los factores de calibración instantáneos $F(ij)$ a partir de las señales instantáneas de los piranómetros**

Con la Ecuación 2.1, se obtiene el factor de calibración instantáneo  $F(ij)$  a partir de dos lecturas de señal instantáneas.

$$F(ij) = \frac{V_r(ij)}{V_p(ij)} * F_r$$

#### **Ecuación 2.1. Factor de calibración instantáneo**

Donde:

- $V_r(ij)$  y  $V_p(ij)$  son señales eléctricas instantáneas en milivoltios (mV) del piranómetro de referencia y de prueba respectivamente, en la serie  $j$ .
- $F_r$  es el factor de calibración del piranómetro de referencia en ( $W/m^2 \cdot mV$ ). A este factor también se lo conoce como sensibilidad, con las siguientes unidades ( $\mu V/W \cdot m^2$ ).

Para encontrar los demás factores de calibración instantáneos  $F(ij)$  de la serie, se reemplaza la Ecuación 2.1 con las lecturas instantáneas de señal de ambos instrumentos recolectadas de forma simultánea. Debido a que se maneja un gran número de datos, se recurre a usar una hoja de cálculo de Excel.

#### **2.2.2.2 Paso 8: Determinar el factor de calibración $F(j)$ , para cada serie de medición “ $j$ ” a partir de “ $n$ ” lecturas de señales instantáneas.**

Con la Ecuación 2.2, se encuentra el factor de calibración de una serie de medición  $j$ .

$$F(j) = \frac{F_r \sum_{i=1}^n V_r(ij)}{\sum_{i=1}^n V_p(ij)}$$

#### **Ecuación 2.2. Factor de calibración por serie**

Donde:

- $\sum_{i=1}^n V_r(ij)$  es el sumatorio de todas las señales instantáneas del piranómetro de referencia.
- $\sum_{i=1}^n V_p(ij)$  es el sumatorio de todas las señales instantáneas del piranómetro de prueba.
- $F_r$  es el factor de calibración del piranómetro de referencia.

En todas las series de medición del proceso de calibración, se tiene que determinar el factor de calibración  $F(j)$ .

### 2.2.2.3 Paso 9: Estabilidad y Rechazo de mediciones

Para conocer la estabilidad de condiciones de medición en una serie, se tiene que calcular la desviación estándar de los factores de calibración instantáneos  $F(ij)$ . Así mismo, para conocer la estabilidad de medición de todo el proceso de calibración, se determina la desviación estándar de los factores de calibración por serie  $F(j)$ , una vez que se hayan encontrado todos los factores de calibración por serie, es decir, al final del proceso de calibración.

Luego, se procede a rechazar los datos instantáneos de señal involucrados en problemas durante el proceso de calibración, como los valores de  $F(ij)$  que se desvían  $\pm 2\%$  de  $F(j)$ .

Con la Ecuación 2.3, se obtiene la desviación de los factores  $F(ij)$  respecto al factor  $F(j)$  de la serie.

$$\text{Desviación \%} = \frac{F(ij) - F(j)}{F(j)} * 100$$

#### Ecuación 2.3. Desviación del factor de calibración instantáneo

Donde:

- $F(ij)$  es el factor de calibración instantáneo.
- $F(j)$  es el factor de calibración de la serie.

Una vez que se haya filtrado estos datos, se repite el paso número ocho con los datos limpios.

#### 2.2.2.4 Paso 10: Encontrar el factor de calibración final de todo el proceso de calibración.

Según la norma ISO 9847, si durante una serie de mediciones  $j$  la temperatura  $T$  se desvía  $\pm 10$  °C del valor típico  $T_n$ , se calcula el factor de calibración de la serie corregido por la temperatura, con la Ecuación 2.4.

$$F_{corr}(j, T_n) = F(j) \left( \frac{R_T[T(j)]}{R_T[T_n]} \right)$$

#### Ecuación 2.4. Corrección del Factor de calibración en la serie

Donde

- $T(j)$  es la temperatura media del aire en la serie de mediciones en °C.
- $R_T[T(j)]$  y  $R_T[T_n]$  son las responsabilidades de temperatura del piranómetro prueba en  $T(j)$  y  $T_n$ , donde  $R = 1/F$ . Para ciertos tipos de piranómetros, se conoce que el coeficiente  $\alpha$  de responsabilidad de temperatura viene dado por la siguiente relación:  $R[T(j)] = \{1 + \alpha [T(j) - T_n]\}$ .

Una vez que se haya conseguido todos los factores de calibración por serie corregidos por la temperatura, se determina el factor final de calibración corregido ( $F_{corr}$ ), con la Ecuación 2.5.

$$F_{corr} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F_{corr}(j, T_n)$$

#### Ecuación 2.5. Corrección del Factor de calibración de todo el proceso

Donde

- $m$  es número de todas las series de medición.
- $\sum_{j=1}^m F_{corr}(j, T_n)$  es la sumatoria de todos los factores de calibración por serie corregidos por la temperatura.

En caso de que no se requiera realizar la corrección al factor de calibración o no se sea posible corregirlo, se calcula el factor de calibración final del proceso con la Ecuación 2.6.

$$F = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F(j)$$

## Ecuación 2.6. Factor de calibración final del proceso

Donde

- $m$  es número de todas las series de medición.
- $\sum_{i=1}^m F(j)$  es la sumatoria de todos los factores de calibración por serie.

Finalmente, cuando se determina el factor de calibración final, el proceso de calibración se concluye.

### 2.3 Elaboración del manual de calibración

En base a la experimentación del proceso de calibración, se procede a redactar el manual. Es importante señalar que, este manual estará dirigido al personal técnico encargado de la calibración de estos instrumentos, por lo que su redacción y explicación tiene que ser clara.

La estructura del manual estará brevemente explicada en las siguiente numeración.

**1. Resumen:** Se presenta de manera rápida un panorama general del manual de calibración y el motivo o causa por la que fue elaborado.

**2. Alcance:** Se describe brevemente las tareas límite que abarca el manual. En este caso, el método de calibración que se va a detallar es el tipo la, en diferentes condiciones de cielo.

**3. Definiciones:** En esta sección se exponen las definiciones de mayor relevancia para comprender el proceso de calibración de los piranómetros.

**4. Procedimiento de calibración:** Se explica de manera clara y concisa el método de calibración a usar. Esta parte del manual comprenderá el proceso de instalación de los equipos, como el proceso matemático para encontrar el factor de calibración final.

**5. Registro de calibración:** Se presenta un formato de informe para llevar un registro y documentación breve del proceso de calibración, acorde a los requerimientos necesarios que sugiere la norma.

**6. Referencias:** Se expone en forma de lista todos los documentos usados para la elaboración del documento, incluido principalmente la norma ISO 9847.

Por último, con este breve esquema de calibración, se procede redactar el manual de calibración en base a la experiencia obtenida en la fase de experimentación. El manual de calibración de piranómetros de campo estará redactado en el ANEXO V del documento.

### 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados y Discusión

En esta sección, por medio de tablas se expone los factores de calibración por serie  $F(j)$ , seguido de los factores de calibración final obtenidos en los dos procesos de calibración. Adicionalmente, para analizar el comportamiento y tendencia de los factores  $F(j)$  en cada proceso de calibración, se elaboró; tablas, histogramas, polígonos de frecuencias y diagramas de cajas y bigotes

Por otra parte, para analizar y comprobar el ajuste de la medición del piranómetro de prueba respecto al patrón, se utilizaron indicadores estadístico como RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error), evaluados en diferentes estados; antes del proceso de calibración, durante las series de medición para cada factor  $F(j)$  y después del proceso de calibración. En las Ecuaciones 3.1 y 3.2, se encuentran las fórmulas de los indicadores estadísticos a evaluar.

$$RMSE \% = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n (I_{MS\ 40,i} - I_{MS\ 80,i})^2}{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n I_{MS\ 80,i}^2}} * 100$$

**Ecuación 3.1.** RMSE [2, p. 7]

$$MBE \% = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n (I_{MS\ 40,i} - I_{MS\ 80,i})}{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n I_{MS\ 80,i}} * 100$$

**Ecuación 3.2.** MBE [2, p. 7]

Donde:

- $n$  es el número de mediciones instantáneas de irradiancia solar obtenidas en las series de medición.
- $I_{MS\ 40,i}$  y  $I_{MS\ 80,i}$  son las mediciones de irradiancia solar instantáneas de cada piranómetro en la serie de medición.

Es necesario considerar, la irradiancia instantánea del piranómetro de prueba ( $I_{MS\ 40,i}$ ) cambia en función al factor de calibración que se analice en diferentes estados de análisis de error. Por otro lado, la irradiancia instantánea del piranómetro patrón ( $I_{MS\ 80,i}$ ) es la misma en todo el análisis, debido a que no cambia su factor de calibración, además se considera como referencia en la medida.

### 3.1.1 Factor de calibración final del primer proceso de calibración en condiciones de cielo nublado e inestable

Tabla 3.1. Factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo nublado

Número de series (m)	$F(j)$ ( $W/m^2 \cdot mV$ )	Fecha	Hora	Variación de Temperatura en la serie °C	Estabilidad de condiciones de medición - $\sigma(F(ij))$ ( $W/m^2 \cdot mV$ )	Número de días
1	80.118	12/23/2023	12:00-13:00	0.9	1.112	1
2	80.491	12/23/2023	13:00-14:00	1.8	1.319	
3	80.691	12/23/2023	14:00-15:00	1.8	1.471	
4	81.387	12/24/2023	9:00 - 10:00	2.4	0.595	2
5	82.457	12/24/2023	10:00 - 11:00	3.0	4.576	
6	82.931	12/24/2023	11:00 - 12:00	1.9	8.344	
7	82.143	12/24/2023	12:00- 13:00	2.8	8.502	
8	81.804	12/24/2023	13:00 - 14:00	1.7	5.216	
9	82.076	12/24/2023	14:00 - 15:00	1.7	8.644	
10	81.269	12/24/2023	15:00 - 16:00	1.2	3.253	
11	81.329	12/25/2023	8:00 - 9:00	0.6	0.650	3
12	81.782	12/25/2023	9:00 - 10:00	4.8	2.492	
13	82.275	12/25/2023	10:00-11:00	1.6	1.932	
14	81.837	12/25/2023	11:00-12:00	2.4	6.405	
15	81.953	12/25/2023	12:00-13:00	1.9	3.944	
16	81.418	12/25/2023	13:00-14:00	1.8	2.092	
17	81.698	12/25/2023	14:00-15:00	1.5	0.611	
18	82.345	12/26/2023	10:00-11:00	2.7	3.670	4
19	82.173	12/26/2023	11:00-12:00	1.6	2.171	
20	82.264	12/26/2023	12:00-13:00	1.7	1.628	
21	81.711	12/26/2023	13:00-14:00	1.6	1.296	
22	80.844	12/26/2023	14:00-15:00	1.2	1.199	5
23	80.861	12/27/2023	12:00-13:00	0.9	2.235	
24	81.298	12/27/2023	13:00-14:00	2.4	1.987	
25	81.512	12/27/2023	14:00-15:00	2.1	1.562	
26	81.481	12/27/2023	15:47-16:47	2.2	2.802	6
27	81.846	12/28/2023	8:32-9:32	3.7	2.737	
28	81.149	12/28/2023	9:32-10:32	2.2	4.488	
29	81.633	12/28/2023	10:32-11:32	2.8	4.827	
30	81.762	12/28/2023	12:00 - 13:00	1.8	4.946	7
31	80.579	12/29/2023	10:00 - 11:00	2.0	5.895	
32	80.960	12/29/2023	11:00 - 12:00	1.9	6.702	
33	82.077	12/29/2023	12:00 - 13:00	2.0	5.041	
34	82.156	12/29/2023	13:00 - 14:00	1.7	6.341	
35	81.826	12/29/2023	14:00 - 15:00	2.2	7.204	
36	81.380	12/29/2023	15:00 - 16:00	1.9	6.916	
37	81.426	12/30/2023	8:00 - 9:00	2.7	2.731	8
38	82.400	12/30/2023	9:00 - 10:00	2.0	2.792	
39	82.853	12/30/2023	10:00 - 11:00	3.0	0.268	
40	82.543	12/30/2023	11:00 - 12:00	2.2	0.462	
41	82.494	12/30/2023	12:00 - 13:00	2.6	6.954	
42	82.731	12/30/2023	13:00 - 14:00	3.3	5.315	
43	82.498	12/31/2023	10:00 - 11:00	2.2	1.942	
44	82.533	12/31/2023	11:00 - 12:00	2.1	2.190	9
45	82.110	12/31/2023	12:00 - 13:00	1.6	3.949	
46	82.074	12/31/2023	13:00 - 14:00	2.5	4.145	10
47	81.946	1/1/2024	11:25 - 12:25	2.7	3.548	
48	82.333	1/1/2024	12:25 - 13:25	1.7	5.065	
49	80.694	1/1/2024	13:25 - 14:25	1.4	3.630	
50	81.664	1/2/2024	13:30 - 14:30	1.1	0.723	
51	81.434	1/2/2024	14:30 - 15:30	0.9	0.887	11

En la Tabla 3.1, se presenta resumidamente: el total de series de medición, seguido de los factores de calibración  $F(j)$ , la fecha y hora de medición, la variación de temperatura del aire y la estabilidad de las condiciones de medición en las series.

En esta tabla, se observan varios factores de calibración  $F(j)$  obtenidos en el primero proceso de calibración, los cuales varían desde 80,12 hasta 82,93 ( $W/m^2 \cdot mV$ ). Se debe destacar, la máxima variación de la temperatura del aire fue en la serie número 12 con un valor de  $4,8^{\circ}C$ , por lo que no es necesario encontrar los factores de calibración corregidos por la temperatura.

Por último, el valor máximo de desviación estándar de  $F(ij)$  es de 8,64 ( $W/m^2 \cdot mV$ ) en la serie número 9, que indica una baja estabilidad de medición en la mayoría de las series. Esto a causa de los cambios bruscos en las mediciones de irradiancia de los dos piranómetros, debido a la variabilidad en la nubosidad.

Por otra parte, en la Tabla 3.2 se muestra el factor de calibración final del piranómetro de prueba con un valor de  $81,750 \pm 0,091$  ( $W/m^2 \cdot mV$ ) en condiciones de cielo nublado e inestable. Adicionalmente, la estabilidad de las condiciones de medición en el primer proceso de calibración es 0,647 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), indicando que gran parte de los factores de calibración por serie están al menos a 0,647 ( $W/m^2 \cdot mV$ ) del factor de calibración final o su valor medio.

**Tabla 3.2.** Factor de calibración final en condiciones de cielo nublado

<b>Factor de calibración final en condiciones de cielo nublado e inestable</b>	
Estabilidad de todo el proceso de calibración (Desviación estándar $F(j)$ ( $W/m^2 \cdot mV$ ))	0,647
Incertidumbre absoluta	$\pm 0,091$
Número de series de mediciones (m)	51
Sumatoria de los factores de calibración de todas las series ( $\sum_{j=1}^m F(j)$ )	4169,248
Factor de calibración final ( $W/m^2 \cdot mV$ )	81,750
Factor de calibración final expresado en ( $\mu V/W \cdot m^2$ )	12,232

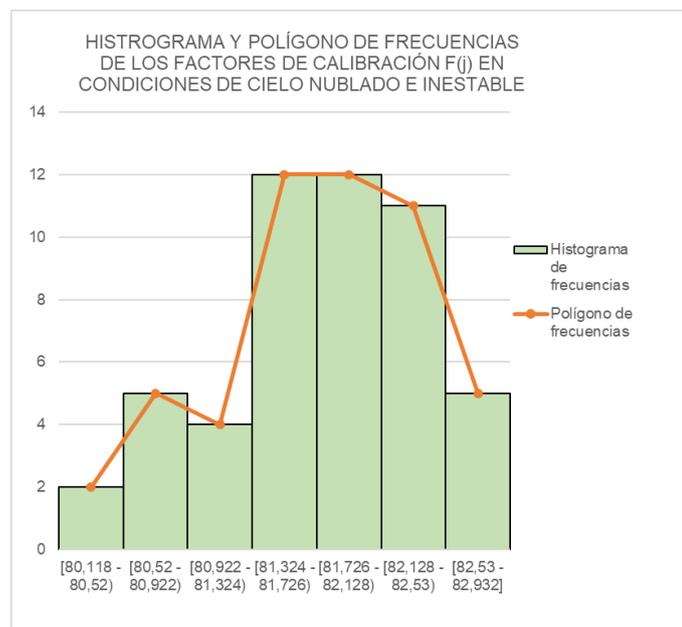
Hay que tomar en consideración que, mientras aumenta la desviación estándar de los factores  $F(j)$ , la estabilidad del proceso de calibración tiende a bajar. Para este primer proceso de calibración, la estabilidad de todo el proceso es baja en contraste a las altas

estabilidades que tienen los procesos de calibración con el método de interiores (tipo II). Acorde a los informes de calibración de fábrica de los piranómetros MS 80 y MS 40, que se encuentran en el ANEXO IV, se conoce que la desviación estándar de los factores  $F(j)$  con el método de calibración en interiores (tipo II) no supera los 0,047 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), presentado una alta estabilidad del proceso.

Complementariamente, en vista de la desviación existente de factores de calibración en cada serie, se realizó una tabla de frecuencias acompañada de un histograma y un polígono para observar su comportamiento y tendencia.

**Tabla 3.3.** Tabla de frecuencias de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo nublado e inestable

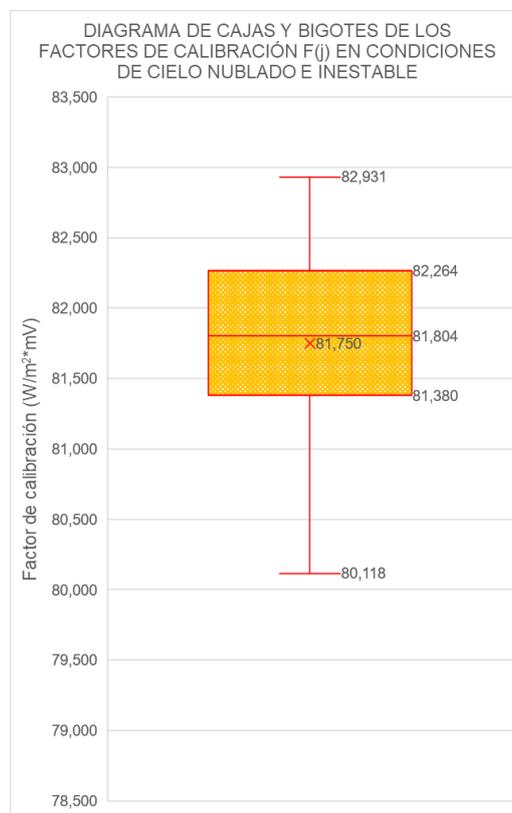
Rangos del factor de calibración por serie ( $F(j)$ )	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa %
[80,118 - 80,52)	2	2	0,039	3,922%
[80,52 - 80,922)	5	7	0,098	9,804%
[80,922 - 81,324)	4	11	0,078	7,843%
[81,324 - 81,726)	12	23	0,235	23,529%
[81,726 - 82,128)	12	35	0,235	23,529%
[82,128 - 82,53)	11	46	0,216	21,569%
[82,53 - 82,932]	5	51	0,098	9,804%
$\Sigma$	51		1	100,000%



**Figura 3.1.** Histograma y polígono de frecuencias de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo nublado e inestable

Acorde a la Figura 3.1, los rangos de  $F(j)$  con mayor frecuencia son: [81,324 – 81,726( y [81,726 – 82,128(, ocupando el 47,058 % de los factores de calibración por serie en el proceso de calibración. Además, el 78,431 % de los valores  $F(j)$  se encuentra acumulados al lado derecho del histograma, presentado una asimetría y variabilidad entre los factores de calibración.

Luego, se elaboró un diagrama de cajas y bigotes en el que no se encontró valores atípicos. También, este diagrama presenta una asimetría negativa, debido a que la media de 81,750 es menor a la mediana de 81,804 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), provocando mayor concentración de datos en el segundo (81,804) y tercer (82,264) cuartil.



**Figura 3.2.** Diagrama de cajas y bigotes de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo nublado e inestable

### 3.1.2 Factor de calibración final en condiciones de cielo sin nubes y estable

**Tabla 3.4.** Factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo sin nubes y estable

Número de series (m)	$F(j)$ ( $W/m^2 \cdot mV$ )	Fecha	Hora	Variación de la Temperatura del aire en la serie ( $^{\circ}C$ )	Estabilidad de condiciones de medición - $\sigma$ ( $F(ij)$ ) ( $W/m^2 \cdot mV$ )	Número de Días
1	82.610	1/6/2024	9:00 - 9:15	1.9	0.194	1
2	82.476	1/6/2024	9:15 - 9:30	1.0	0.196	
3	82.679	1/6/2024	9:30 - 9:45	0.9	0.217	
4	82.547	1/6/2024	9:45 - 10:00	1.3	0.228	
5	83.043	1/6/2024	10:00 - 10:15	1.3	0.246	
6	83.289	1/6/2024	10:15 - 10:30	1.1	0.220	
7	83.224	1/6/2024	10:30 - 10:45	1.1	0.210	
8	83.235	1/6/2024	10:45 - 11:00	0.8	0.238	
9	82.352	1/7/2024	9:15 - 9:30	1.1	0.237	2
10	82.338	1/7/2024	9:30 - 9:45	1.4	0.273	
11	82.263	1/7/2024	9:45 - 10:00	1.2	0.241	
12	82.107	1/7/2024	10:30 - 10:45	0.8	0.275	
13	82.218	1/7/2024	10:45 - 11:00	0.8	0.220	
14	81.934	1/7/2024	13:30-13:45	0.8	0.191	3
15	82.568	1/19/2024	14:00-14:15	1.4	0.300	

De manera similar, en la Tabla 3.4 se presenta resumidamente: el total de las series de medición, los factores de calibración  $F(j)$ , la fecha y hora de medición, la variabilidad de la temperatura del aire y la estabilidad de condiciones de medición en las series.

En la Tabla 3.4 se observa que los valores de  $F(j)$  varía desde 81,934 hasta 83,228 ( $W/m^2 \cdot mV$ ). En estas condiciones, la máxima variación de temperatura en el aire es  $1,9^{\circ}C$  en la serie 1, por lo que no es necesario encontrar los factores de calibración corregidos por la temperatura.

Por último, el máximo valor de desviación estándar  $F(ij)$  es de 0,3 ( $W/m^2 \cdot mV$ ) en la serie número 15, indicando una mejor estabilidad en las series que el proceso anterior. Esta mejora, se debe a las condiciones de cielo estable y sin nubes, donde no existe cambios repentinos en las lecturas de medición de los piranómetros.

Adicionalmente, tal como se muestra en Tabla 3.5, el factor de calibración final para el piranómetro de prueba en condiciones de cielo sin nubes es  $82,592 \pm 0,111$  ( $W/m^2 \cdot mV$ ). Por otra parte, la desviación estándar de todos los factores de calibración  $F(j)$  es 0,428 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), presentado una mayor estabilidad del proceso de calibración en comparación con el primer proceso.

Cabe mencionar, que la estabilidad del este proceso de calibración sigue siendo baja respecto a las estabilidades de los procesos de calibración con el método en interiores (tipo II).

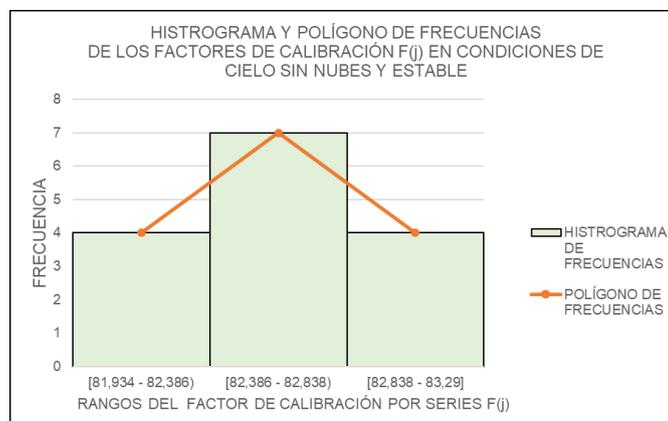
**Tabla 3.5.** Factor de calibración final en condiciones de cielo sin nubes y estable

Factor de calibración final en condiciones de cielo sin nubes y estable	
Estabilidad de todo el proceso de calibración (Desviación estándar $F(j)$ ( $W/m^2 \cdot mV$ ))	0,428
Incertidumbre absoluta	$\pm 0,111$
Número de series de mediciones (m)	15
Sumatoria de los factores de calibración de todas las series ( $\sum_{j=1}^m F(j)$ )	1238,883
Factor de calibración final ( $W/m^2 \cdot mV$ )	82,592
Factor de calibración final expresado en ( $\mu V/W \cdot m^{-2}$ )	12,108

Como se evidencia una desviación de los factores  $F(j)$  alrededor de su valor medio, se procede a elaborar una tabla de frecuencias con un histograma y polígono para observar la tendencia y distribución de estos datos.

**Tabla 3.6.** Tabla de frecuencias de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo sin nubes y estable

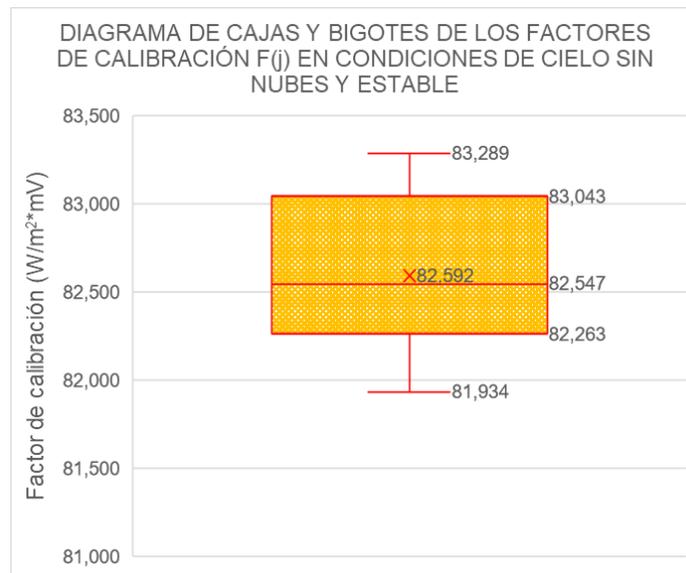
Rangos del factor de calibración por serie ( $F(j)$ )	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa %
[81,934 - 82,386)	4	4	0,267	26,667%
[82,386 - 82,838)	7	11	0,467	46,667%
[82,838 - 83,29]	4	15	0,267	26,667%
$\Sigma$	15		1,000	100,000%



**Figura 3.3.** Histograma y polígono de frecuencias de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo sin nubes y estable.

Analizando la Figura 3.3, existe una simetría de valores alrededor de su valor medio, reduciendo su variación. Sumando a esto, la mayor concentración de los factores  $F(j)$  está dentro de este rango:  $[82,386 - 82,838($  .

Complementariamente, se realizó un diagrama de cajas y bigotes, donde no existe valores atípicos. No obstante, se puede notar que la caja del diagrama de la Figura 3.4 presenta una asimetría positiva, donde la mediana de 82,547 es menor al valor medio de 82,592 ( $\text{W/m}^2\cdot\text{mV}$ ), indicando mayor concentración de factores  $F(j)$  en el primer (82,263) y segundo cuartil (82,547).



**Figura 3.4** Diagrama de cajas y bigotes de los factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo sin nubes y estable

### 3.1.3 Análisis “RMSE” y “MBE” del primer proceso de calibración en condiciones de cielo nublado e inestable.

En consideración, para el análisis del error antes del proceso, la medición de irradiancia del piranómetro de prueba usa el factor de calibración original de 80,84 ( $\text{W/m}^2\cdot\text{mV}$ ). Mientras que, el análisis del error durante las series de medición para cada  $F(j)$ , la medición de irradiancia cambia acorde a los factores de calibración por serie. Por último, en el análisis de error después del proceso, la medición de irradiancia del instrumento de prueba utiliza el factor de calibración final obtenido del primer proceso, es decir 81,750 ( $\text{W/m}^2\cdot\text{mV}$ ).

### 3.1.3.1 Análisis “RMSE” del primer proceso de calibración en condiciones de cielo nublado e inestable

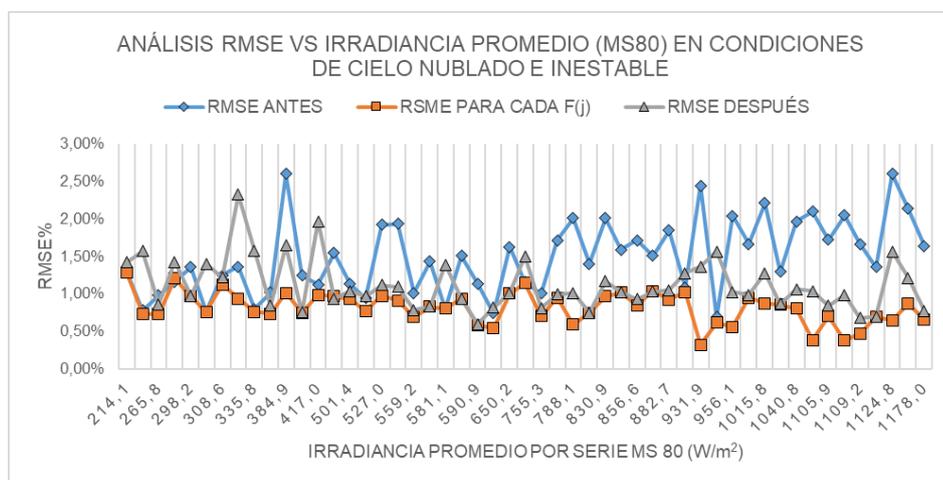
**Tabla 3.7** Análisis RMSE en condiciones de cielo nublado e inestable

NÚMERO DE SERIES (m)	RMSE ANTES %	RMSE PARA CADA F(j) %	RMSE DESPUÉS %	GHI PROMEDIO DEL MS80 (W/m <sup>2</sup> )	FACTOR DE CALIBRACIÓN F(j) (W/m <sup>2</sup> *mV)
1	1,364%	0,939%	2,326%	334,648	80,118
2	1,127%	0,988%	1,965%	417,037	80,491
3	0,800%	0,762%	1,578%	335,803	80,691
4	1,007%	0,706%	0,809%	755,328	81,387
5	2,043%	0,560%	1,028%	956,131	82,457
6	2,602%	0,651%	1,564%	1124,784	82,931
7	1,720%	0,705%	0,843%	1105,916	82,143
8	1,356%	0,694%	0,696%	1109,847	81,804
9	1,719%	0,846%	0,931%	856,554	82,076
10	0,745%	0,543%	0,816%	629,527	81,269
11	0,978%	0,729%	0,862%	265,845	81,329
12	1,431%	0,829%	0,830%	559,853	81,782
13	1,936%	0,911%	1,092%	529,928	82,275
14	1,590%	1,016%	1,023%	842,822	81,837
15	1,626%	1,004%	1,016%	650,215	81,953
16	1,133%	0,931%	1,040%	501,410	81,418
17	1,245%	0,747%	0,754%	411,175	81,698
18	2,013%	0,970%	1,172%	830,947	82,345
19	1,848%	0,927%	1,049%	882,725	82,173
20	1,925%	0,972%	1,118%	526,986	82,264
21	1,359%	0,966%	0,972%	298,249	81,711
22	0,758%	0,759%	1,405%	307,079	80,844
23	0,805%	0,806%	1,392%	581,102	80,861
24	0,946%	0,776%	0,967%	526,496	81,298
25	1,249%	1,124%	1,218%	308,644	81,512
26	1,300%	1,290%	1,423%	214,050	81,481
27	1,509%	0,936%	0,938%	584,748	81,846
28	1,090%	1,028%	1,278%	887,821	81,149
29	1,298%	0,854%	0,865%	1025,678	81,633
30	1,402%	0,749%	0,751%	818,944	81,762
31	0,690%	0,615%	1,567%	932,075	80,579
32	1,155%	1,145%	1,505%	684,482	80,960
33	1,643%	0,662%	0,772%	1177,983	82,077
34	1,667%	0,473%	0,683%	1109,234	82,156
35	1,511%	1,037%	1,032%	867,837	81,826
36	1,165%	1,207%	1,427%	294,989	81,380
37	1,012%	0,693%	0,789%	559,225	81,426
38	2,010%	0,593%	1,010%	788,053	82,400
39	2,443%	0,320%	1,363%	931,910	82,853
40	2,098%	0,383%	1,035%	1072,474	82,543
41	2,138%	0,870%	1,216%	1165,290	82,494
42	2,600%	1,015%	1,645%	384,900	82,731
43	2,048%	0,379%	0,987%	1109,185	82,498
44	2,210%	0,877%	1,276%	1015,803	82,533
45	1,716%	0,949%	0,997%	773,455	82,110
46	1,546%	0,969%	0,938%	438,416	82,074
47	1,666%	0,951%	0,985%	980,050	81,946
48	1,970%	0,804%	1,062%	1040,822	82,333
49	0,778%	0,737%	1,570%	236,862	80,694
50	1,137%	0,585%	0,600%	590,882	81,664
51	1,017%	0,737%	0,846%	372,169	81,434
<b>PROMEDIO</b>	<b>1,493%</b>	<b>0,818%</b>	<b>1,118%</b>	<b>700,125</b>	<b>81,750</b>

Es importante aclarar, que las columnas “RMSE ANTES” y “RMSE DESPUÉS” de la Tabla 3.7, representan el análisis del error comparando la mediciones del piranómetro de prueba respecto al patrón, antes y después de realizar el proceso de calibración. En cambio la columna “RMSE PARA CADA F(j)”, representa el análisis de las mediciones entre los dos piranómetros, pero determinando el error de forma independiente con cada factor de calibración  $F(j)$ , el cual se lo obtuvo en cada serie de medición.

Analizando la Tabla 3.7, por la naturaleza de la Ecuación 3.1 (RMSE), se sabe que los valores de error son absolutos. Además, se observa que el error promedio de la columna “RMSE DESPUÉS” tiene un valor de 1,118 %, el cual es menor en comparación al error promedio de la columna “RMSE ANTES”, con un valor de 1,493%.

Por otro lado, el promedio de error de la columna “RMSE PARA CADA F(j)” con un valor de 0,818 %, es menor en comparación a los promedios de error anteriormente comparados. Esto se debe a que la Ecuación 3.1 calcula el error entre dos mediciones de irradiancia para cada factor de calibración  $F(j)$ , este factor reduce el error en cada serie de medición, debido a que la irradiancia del piranómetro de prueba y del patrón se ajustan de forma independiente por cada  $F(j)$ .



**Figura 3.5.** Análisis RMSE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo nublado e inestable

Para entender el compartimiento del error “RMSE” de la Tabla 3.7, se elaboró un gráfico expuesto en la Figura 3.5, que presenta el comportamiento del error “RMSE” respecto a la irradiancia promedio medida por el piranómetro de referencia, ordenada de menor a mayor magnitud.

Donde, la curva "RMSE ANTES" logra tener mayores valores de error respecto a la curva "RMSE DESPUÉS" en algunos puntos de irradiancia, comúnmente desde 214,1 hasta los 650 ( $W/m^2$ ). Después de este rango de irradiancia, la curva "RMSE ANTES" tiende a tener mayores errores en relación con la curva "RMSE DESPUÉS".

Partiendo del mismo análisis, la curva de error "RMSE ANTES" conforme aumenta la irradiancia promedio de la serie, tiende a subir ligeramente su porcentaje de error. En cambio, las curvas "RMSE PARA CADA F(j) y DESPUÉS" tienden a ser una línea horizontal conforme aumenta la irradiancia, evidenciando que entre las tres curvas no existe un aumento significativo del error cuando aumenta o disminuye la GHI promedio.

En consideración, la curva del error "RMSE PARA CADA F(j)" tiende a tener menores errores en comparación a las demás curvas anteriormente comparadas, debido a lo explicado anteriormente. Por lo que esta curva representaría un proceso de calibración ideal, no un resultado neto de calibración, ya que el ajuste entre las mediciones se lo realiza de forma independiente con cada factor de calibración por serie y no con un factor de calibración fijo para todas las series de medición, como en los análisis antes y después del proceso.

Por lo tanto, con en el primer proceso de calibración donde se obtuvo un factor de calibración final de 81,750 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), el error "RMSE" de las mediciones de irradiancia entre el piranómetro de prueba y el patrón se redujeron en 0,375%, después de haber realizar el proceso de calibración.

### 3.1.3.2 Análisis “MBE” del primer proceso de calibración en condiciones de cielo nublado e inestable

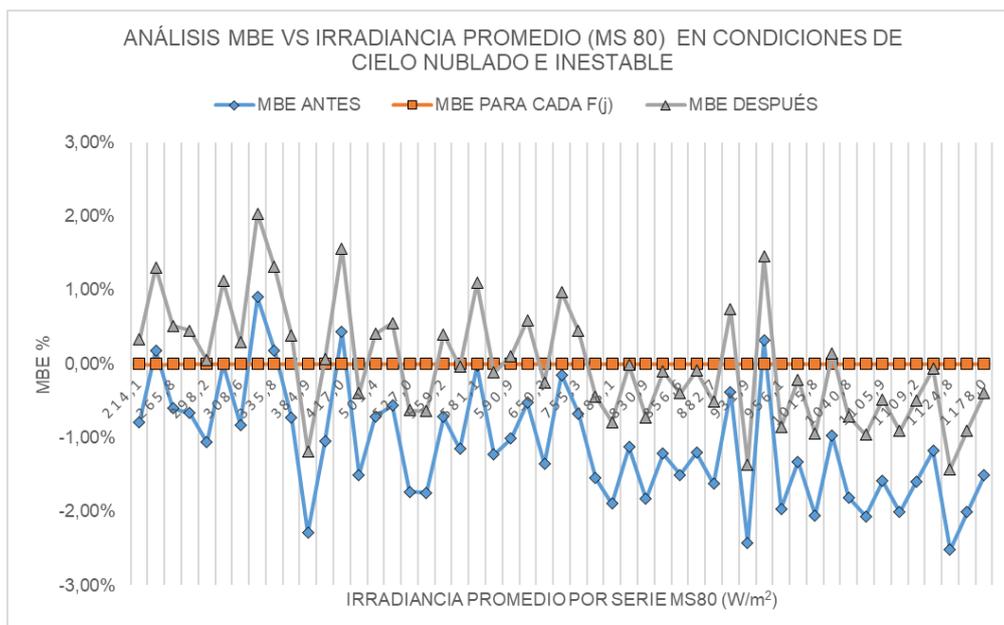
Tabla 3.8. Análisis MBE en condiciones de cielo nublado e inestable

NÚMERO DE SERIES (m)	MBE ANTES %	MBE PARA CADA F(j) %	MBE DESPUÉS %	GHI PROMEDIO DEL MS80 (W/m <sup>2</sup> )	FACTOR DE CALIBRACIÓN F(j) (W/m <sup>2</sup> *mV)
1	0,903%	0,000%	2,037%	334,648	80,118
2	0,434%	0,000%	1,564%	417,037	80,491
3	0,186%	0,000%	1,312%	335,803	80,691
4	-0,671%	0,000%	0,447%	755,328	81,387
5	-1,960%	0,000%	-0,858%	956,131	82,457
6	-2,521%	0,000%	-1,424%	1124,784	82,931
7	-1,586%	0,000%	-0,479%	1105,916	82,143
8	-1,177%	0,000%	-0,066%	1109,847	81,804
9	-1,505%	0,000%	-0,397%	856,554	82,076
10	-0,526%	0,000%	0,592%	629,527	81,269
11	-0,600%	0,000%	0,518%	265,845	81,329
12	-1,151%	0,000%	-0,039%	559,853	81,782
13	-1,744%	0,000%	-0,638%	529,928	82,275
14	-1,217%	0,000%	-0,106%	842,822	81,837
15	-1,357%	0,000%	-0,247%	650,215	81,953
16	-0,709%	0,000%	0,408%	501,410	81,418
17	-1,049%	0,000%	0,064%	411,175	81,698
18	-1,827%	0,000%	-0,723%	830,947	82,345
19	-1,621%	0,000%	-0,515%	882,725	82,173
20	-1,730%	0,000%	-0,625%	526,986	82,264
21	-1,065%	0,000%	0,048%	298,249	81,711
22	-0,004%	0,000%	1,121%	307,079	80,844
23	-0,025%	0,000%	1,099%	581,102	80,861
24	-0,563%	0,000%	0,556%	526,496	81,298
25	-0,823%	0,000%	0,292%	308,644	81,512
26	-0,786%	0,000%	0,330%	214,050	81,481
27	-1,228%	0,000%	-0,117%	584,748	81,846
28	-0,380%	0,000%	0,741%	887,821	81,149
29	-0,971%	0,000%	0,143%	1025,678	81,633
30	-1,126%	0,000%	-0,014%	818,944	81,762
31	0,325%	0,000%	1,453%	932,075	80,579
32	-0,148%	0,000%	0,975%	684,482	80,960
33	-1,506%	0,000%	-0,398%	1177,983	82,077
34	-1,601%	0,000%	-0,494%	1109,234	82,156
35	-1,204%	0,000%	-0,092%	867,837	81,826
36	-0,663%	0,000%	0,454%	294,989	81,380
37	-0,719%	0,000%	0,398%	559,225	81,426
38	-1,893%	0,000%	-0,789%	788,053	82,400
39	-2,429%	0,000%	-1,365%	931,910	82,853
40	-2,062%	0,000%	-0,961%	1072,474	82,543
41	-2,005%	0,000%	-0,903%	1165,290	82,494
42	-2,285%	0,000%	-1,186%	384,900	82,731
43	-2,009%	0,000%	-0,907%	1109,185	82,498
44	-2,050%	0,000%	-0,948%	1015,803	82,533
45	-1,546%	0,000%	-0,439%	773,455	82,110
46	-1,503%	0,000%	-0,395%	438,416	82,074
47	-1,325%	0,000%	-0,215%	980,050	81,946
48	-1,812%	0,000%	-0,708%	1040,822	82,333
49	0,181%	0,000%	1,308%	236,862	80,694
50	-1,008%	0,000%	0,105%	590,882	81,664
51	-0,728%	0,000%	0,388%	372,169	81,434
<b>PROMEDIO</b>	<b>-1,106%</b>	<b>0,000%</b>	<b>0,006%</b>	<b>700,125</b>	<b>81,750</b>

De igual manera, para este análisis, las columnas “MBE ANTES” y “MBE DESPUÉS” de la Tabla 3.8, representan el análisis del error comparando la mediciones del piranómetro de prueba respecto al patrón, antes y después de realizar el proceso de calibración. Por otra parte, la columna “MBE PARA CADA F(j)”, representa el análisis de las mediciones entre los dos piranómetros, pero determinando el error de forma independiente con cada factor de calibración  $F(j)$ .

Estudiando la Tabla 3.8, debido a la naturaleza de la Ecuación 3.2 (MBE), se presentan errores negativos en porcentaje, significando que la medición de irradiancia solar estimada por el piranómetro de prueba es menor en comparación con la medición del piranómetro patrón. En cuanto a los errores positivos indican lo contrario.

En vista de esto, se construye la Figura 3.6 para analizar el comportamiento del error “MBE” conforme aumente la irradiancia.

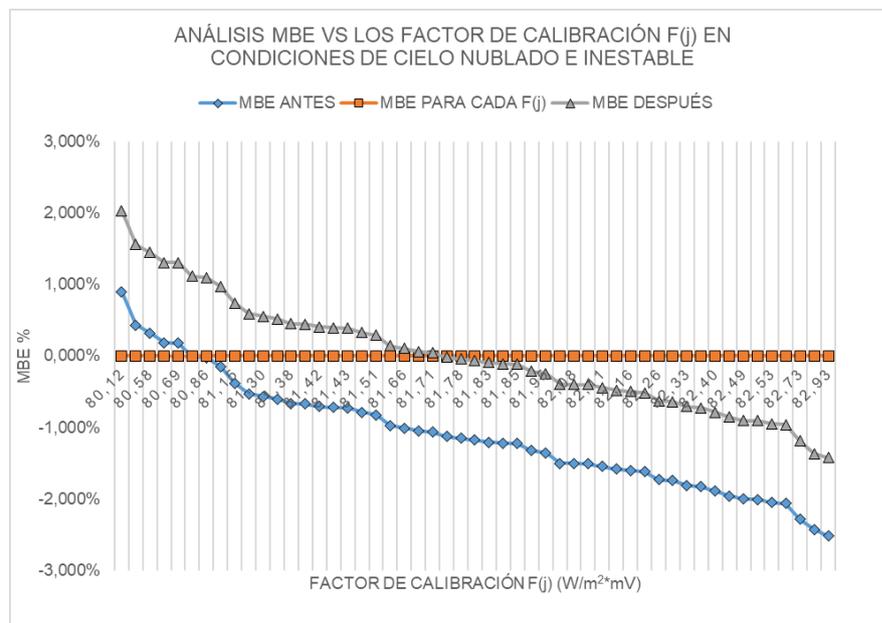


**Figura 3.6.** Análisis MBE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo nublado e inestable

En la Figura 3.6, la curva de error “MBE ANTES” en la mayoría de los valores promedio de irradiancia el error es negativo, el cual aumenta ligeramente en magnitud conforme aumenta la irradiancia, teniendo un error medio de -1,06 %. En otras palabras, la medición de irradiancia del piranómetro patrón es mayor en comparación con la obtenida en el piranómetro de prueba a partir de 500 (W/m<sup>2</sup>), evidenciando un claro desajuste con la medida de referencia antes del proceso de calibración.

En contraste, la curva de error “MBE PARA CADA  $F(j)$ ”, muestra un valor de cero por ciento a lo largo de toda la irradiancia, indicando que la medición del piranómetro de prueba y patrón son iguales. Esto debido a que la Ecuación 3.2 se adapta de manera independiente a las mediciones de irradiancia del instrumento de prueba, que cambia acorde al factor de calibración por serie  $F(j)$ . Como esta curva trabaja de forma independiente, se la considera como una calibración ideal, ya que en el proceso de calibración solo se obtiene un factor de calibración final.

No obstante, en la curva error “MBE DESPUÉS” el error tiende a ser positivo y negativo en ciertos valores de irradiancia, con un valor medio de 0,006 %. En virtud de lo anteriormente dicho, se recurre a la Figura 3.7 para observar el comportamiento del error “MBE” conforme aumenta el factor de calibración  $F(j)$  por serie.



**Figura 3.7.** Análisis MBE vs factores de calibración  $F(j)$  en condiciones de cielo nublado e inestable

Según la Figura 3.7, la curva de error “MBE ANTES” muestra que, a valores inferiores a 80,84 ( $W/m^2 \cdot mV$  - factor de calibración original), las mediciones del piranómetro prueba son mayores con respecto a las del piranómetro patrón, con un error máximo de 0,903%. Y, para valores superiores de 80,84 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), las mediciones de irradiancia del piranómetro de prueba son menores a las del piranómetro patrón, con un error máximo de -2,521%.

Después de realizar el proceso de calibración, en la curva de error “MBE DESPUÉS” se observa, con el factor de calibración final de 81,750 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), el error llega a reducirse

aproximadamente 1% en magnitud, obteniendo un error no mayor a -1,424 % cuando las mediciones del piranómetro prueba son menores a las del piranómetro patrón. Sin embargo, cuando las medidas del piranómetro prueba son mayores, el error incrementa en 1 % llegando a tener errores de 2,037%.

Por lo tanto, con el factor de calibración final del primer proceso, el error llega a reducirse y ajustarse a la medida del instrumento patrón. Pero en ciertos momentos, las mediciones de los piranómetros no tienden a ser iguales, logrando tener errores en magnitud de 2,037%.

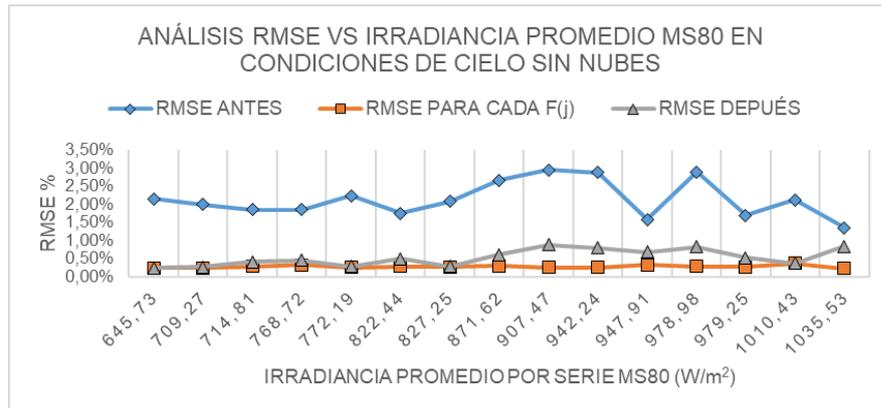
### 3.1.4 Análisis “RMSE” y “MBE” del segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable

En consideración, para el análisis del error antes del proceso, la medición de irradiancia del piranómetro de prueba usa el factor de calibración original de 80,84 (W/m<sup>2</sup>·mV). Mientras que, el análisis del error durante las series de medición para cada  $F(j)$ , la medición de irradiancia cambia acorde a los factores de calibración por serie. Por último, en el análisis de error después del proceso, la medición de irradiancia del instrumento de prueba utiliza el factor de calibración final del segundo proceso, es decir 82,592 (W/m<sup>2</sup>·mV).

#### 3.1.4.1 Análisis “RMSE” del segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable

**Tabla 3.9.** Análisis RMSE en condiciones de cielo sin nubes y estable

NÚMERO DE SERIES (m)	RMSE ANTES %	RMSE PARA CADA F(j)%	RMSE DESPUÉS %	GHI PROMEDIO DEL MS80 (W/m <sup>2</sup> )	FACTOR DE CALIBRACIÓN F(j) (W/m <sup>2</sup> ·mV)
1	2,152%	0,235%	0,236%	645,730	82,610
2	1,996%	0,238%	0,277%	709,267	82,476
3	2,240%	0,261%	0,282%	772,194	82,679
4	2,084%	0,275%	0,280%	827,245	82,547
5	2,671%	0,294%	0,620%	871,622	83,043
6	2,953%	0,263%	0,878%	907,466	83,289
7	2,874%	0,250%	0,799%	942,245	83,224
8	2,893%	0,285%	0,826%	978,976	83,235
9	1,860%	0,288%	0,408%	714,807	82,352
10	1,849%	0,334%	0,455%	768,724	82,338
11	1,751%	0,292%	0,498%	822,436	82,263
12	1,577%	0,333%	0,679%	947,912	82,107
13	1,697%	0,266%	0,527%	979,246	82,218
14	1,354%	0,233%	0,837%	1035,535	81,934
15	2,120%	0,368%	0,370%	1010,429	82,568
<b>PROMEDIO</b>	<b>2,138%</b>	<b>0,281%</b>	<b>0,531%</b>	<b>862,255</b>	<b>82,592</b>



**Figura 3.8.** Análisis RMSE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo sin nubes y estable

Así mismo, en este proceso de calibración, las columnas “RMSE ANTES Y DESPUÉS” de la Tabla 3.9, representan el análisis del error entre las mediciones del piranómetro de prueba y patrón, antes y después del proceso. Y, la columna “RMSE PARA CADA F(j)”, representa el mismo análisis, pero de manera independiente con cada factor de calibración  $F(j)$ .

En la Figura 3.8 se puede observar el comportamiento del error “RMSE” conforme aumenta la irradiancia. Existe gran diferencia entre los errores antes y después del proceso de calibración. La curva de error “RMSE ANTES” a lo largo de la irradiancia permanece alrededor de un error promedio de 2,138%, y la curva error “RMSE DESPUÉS” se mantiene estable con un error promedio de 0,531%, acoplándose a la curva “RMSE PARA CADA F(j)” que permanece estable a 0,281% del error promedio.

Es importante mencionar que, de igual forma en estas condiciones de cielo, el error “RMSE” analizado para cada serie de medición  $F(j)$ , sigue siendo menor que los errores promedios anteriormente dichos. Esto por la naturaleza de la Ecuación 3.1, que se explicó anteriormente en el análisis del error en condiciones de cielo nublado.

Por lo tanto, con el factor calibración final de 82,592 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), el error entre las mediciones del piranómetro de prueba y del patrón se redujeron en 1,607%, después de haber realizado el proceso de calibración. Así mismo, se puede notar que las curvas “RMSE ANTES”, “RMSE PARA CADA F(j)” y “RMSE DESPUÉS” tienden a ser una línea horizontal, es decir, el error promedio “RMSE” permanece constante a medida que aumenta la irradiancia solar.

Por último, el error “RMSE” después de realizar este proceso de calibración en ningún valor de irradiancia promedio, llega a ser superior al error antes de realizar el proceso de calibración.

### 3.1.4.2 Análisis “MBE” del segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable

Tabla 3.10. Análisis MBE en condiciones de cielo sin nubes y estable

NÚMERO DE SERIES (m)	MBE ANTES %	MBE PARA CADA F(j) %	MBE DESPUÉS %	GHI PROMEDIO DEL MS80 (W/m <sup>2</sup> )	FACTORES DE CALIBRACIÓN F(j) (W/m <sup>2</sup> *mV)
1	-2,142%	0,000%	-0,022%	645,730	82,610
2	-1,983%	0,000%	0,141%	709,267	82,476
3	-2,223%	0,000%	-0,104%	772,194	82,679
4	-2,067%	0,000%	0,055%	827,245	82,547
5	-2,652%	0,000%	-0,543%	871,622	83,043
6	-2,939%	0,000%	-0,836%	907,466	83,289
7	-2,864%	0,000%	-0,759%	942,245	83,224
8	-2,877%	0,000%	-0,773%	978,976	83,235
9	-1,835%	0,000%	0,291%	714,807	82,352
10	-1,818%	0,000%	0,309%	768,724	82,338
11	-1,729%	0,000%	0,400%	822,436	82,263
12	-1,542%	0,000%	0,591%	947,912	82,107
13	-1,675%	0,000%	0,455%	979,246	82,218
14	-1,335%	0,000%	0,803%	1035,535	81,934
15	-2,092%	0,000%	0,029%	1010,429	82,568
<b>PROMEDIO</b>	<b>-2,118%</b>	<b>0,000%</b>	<b>0,003%</b>	<b>862,255</b>	<b>82,592</b>

Revisando la Tabla 3.10, debido a la naturaleza de la Ecuación 3.2, se presentan errores negativos, donde la medición de irradiancia del piranómetro de prueba es menor a la del piranómetro patrón. En cambio, los valores positivos representan lo contrario. En vista de esto, se construye la Figura 3.9 para observar el comportamiento del error “MBE” conforme aumenta la irradiancia.

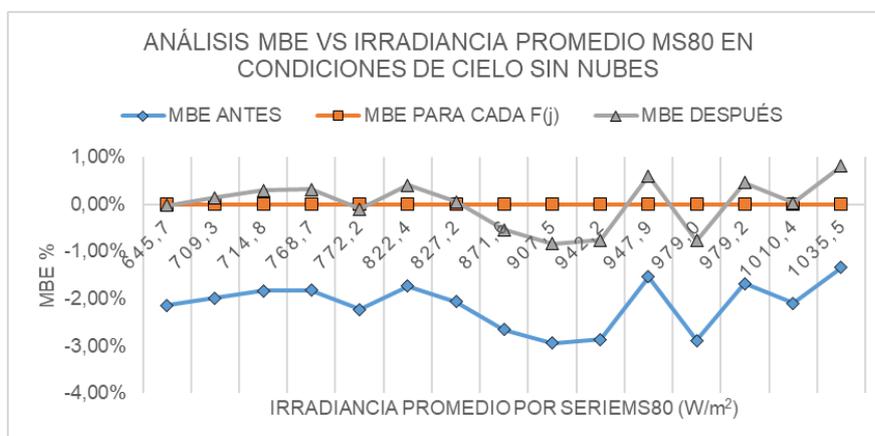
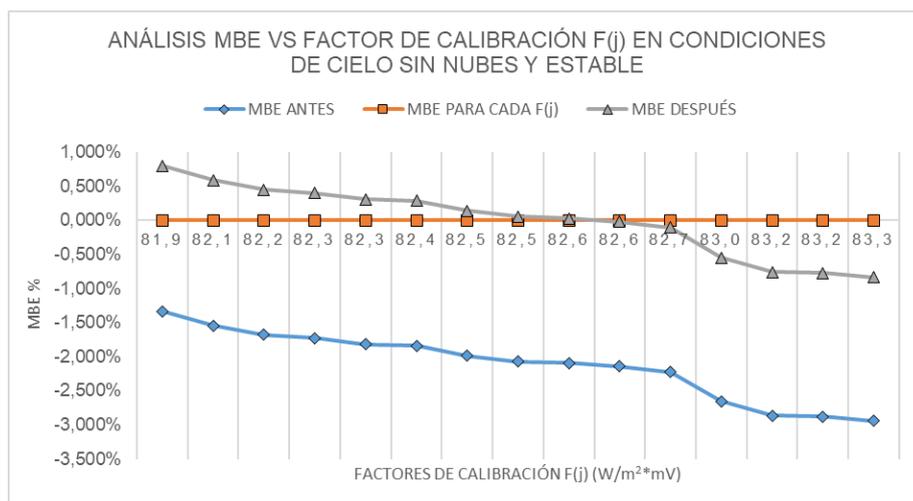


Figura 3.9. Análisis MBE vs Irradiancia promedio en condiciones de cielo sin nubes y estable

En la Figura 3.9, la curva “MBE ANTES” en todos los valores promedio de irradiancia el error es negativo, con un error medio de -2.118 %. Además, la curva tiende a permanecer constante a medida que aumenta la irradiancia. Por tal motivo, la medición de irradiancia del instrumento patrón es mayor en comparación con la del instrumento de prueba, evidenciando un desajuste con la medida de referencia antes del proceso de calibración.

La curva “MBE PARA CADA F(j)” a lo largo de toda la irradiancia es cero, donde la medición del instrumento de prueba y la del patrón son prácticamente iguales. Esta curva representaría un calibración ideal del proceso de calibración, por lo anteriormente mencionado en el primer proceso de calibración.

Por otra parte, en la curva “MBE DESPUÉS”, el error tiende a ser positivo y negativo en ciertos valores de irradiancia con un valor medio de 0,003 %. A causa de esto, se recurre a la Figura 3.10 para observa el comportamiento del error conforme aumenta el factor de calibración  $F(j)$  por serie.



**Figura 3.10.** Análisis MBE vs Factores  $F(j)$  en condiciones de cielo sin nubes

En la Figura 3.10, la curva “MBE ANTES” muestra que, entre 81,9 hasta 83,3(W/m²·mV), el error es negativo con un valor máximo de -2,939 %. Por lo tanto, a lo largo de la recolección de datos se evidencia que a partir de factores superiores de 81,9 (W/m²·mV) las mediciones de irradiancia del piranómetro de prueba son menores respecto a las del piranómetro patrón, con un error máximo de -2,939%.

Después de realizar el proceso de calibración, en la curva “MBE DESPUÉS” se observa que, a valores inferiores de 82,592 (W/m²·mV), errores positivos con un valor máximo de

0,803%. Pero a valores superiores de este factor de calibración, existe presencia de errores negativos con un error máximo de -0,836%.

Por lo tanto, en el segundo proceso de calibración, donde se obtuvo un factor de calibración final de 82,592 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), el error "MBE" entre las mediciones del piranómetro de prueba y patrón se redujeron en 2,1%. Evidenciando un ajuste en la medición del piranómetro de prueba respecto al piranómetro patrón después de realizar el proceso de calibración.

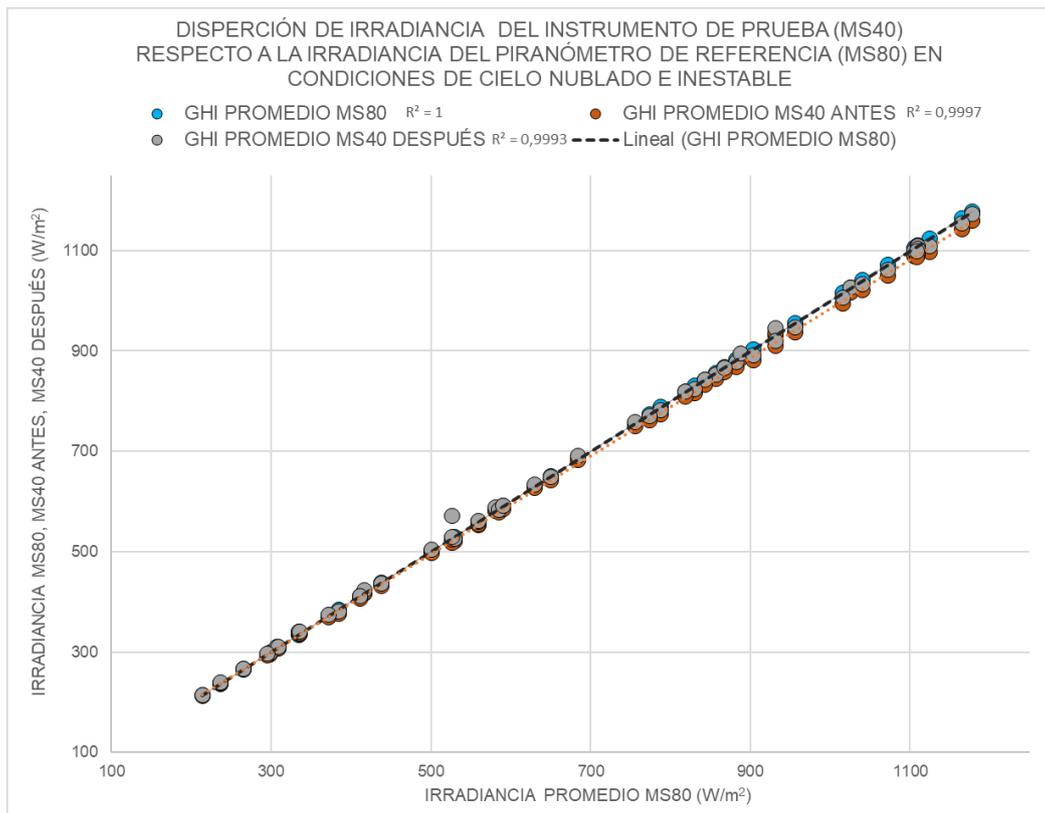
Es importante comentar que, las lecturas de los dos instrumentos no van a ser en todo momento iguales, obteniendo errores no mayores al -0,836 % cuando las mediciones de irradiancia del piranómetro de prueba sean inferiores a las del piranómetro patrón. Además, se obtendrá errores no superiores al 0,803%, cuando las mediciones del piranómetro de prueba sean superiores a las del piranómetro patrón.

### 3.1.5 Dispersión de la Irradiancia respecto a la medida del instrumento patrón en condiciones de cielo nublado e inestable

En el Figura 3.11, se muestra una comparativa entre la irradiancia promedio del piranómetro de prueba con la medición promedio del piranómetro patrón, antes y después del proceso de calibración en condiciones de cielo nublado.

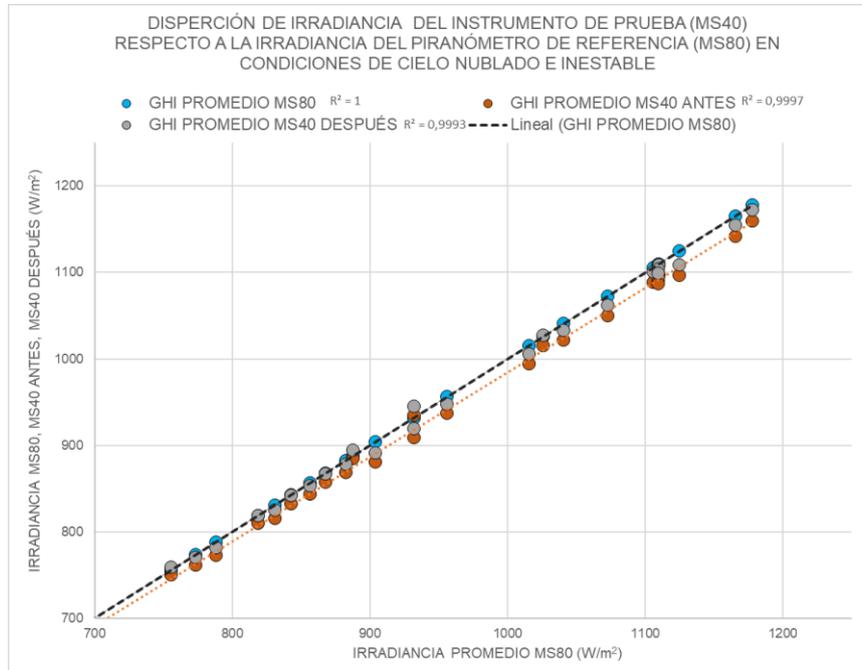
La línea entre cortada y los círculos de color azul representan la medición de referencia del piranómetro patrón. Además, esta línea tiene una correlación directa positiva, es decir, la variable dependiente como la independiente crecen simultáneamente y se ajustan de forma perfecta entre sí, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 1$ .

En contraste, los círculos y líneas de color naranja representan la medida de irradiancia promedio del piranómetro de prueba antes del proceso de calibración, respecto con la medida de referencia. Donde, la tendencia de estos círculos presenta una correlación directa positiva con un coeficiente  $R^2 = 0,9997$ , sin ajustarse a la línea de referencia del piranómetro patrón.



**Figura 3.11.** Dispersión de la irradiancia del piranómetro de prueba respecto a la irradiancia del piranómetro patrón, en condiciones de cielo nublado e inestable

En la Figura 3.12, se realizó un acercamiento a partir de los 700 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) de irradiancia, para observar el desajuste entre las medidas representadas por los círculos naranjas respecto a la línea de referencia.



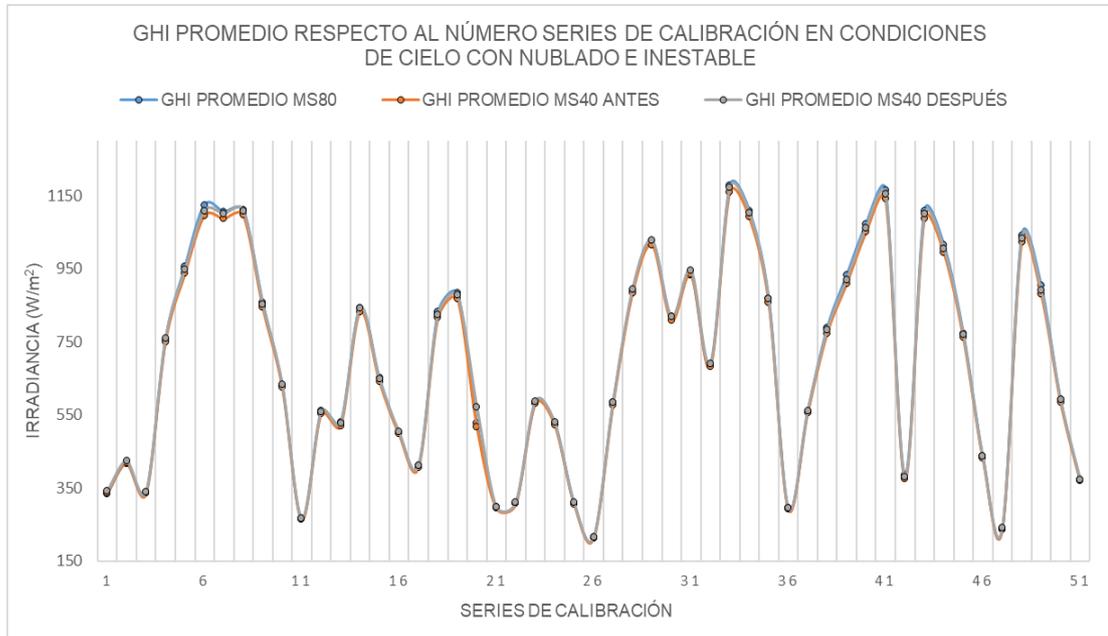
**Figura 3.12.** Acercamiento para verificar el desajuste de la Figura 3.11

Sin embargo, las circunferencias y las líneas de color plateado representan la medida de irradiancia del piranómetro de prueba después del proceso de calibración, respecto a la medida de referencia. De igual forma, la tendencia de estos círculos sigue una correlación directa positiva con un coeficiente  $R^2 = 0,9993$ , pero ajustándose de mejor forma a la línea de referencia del piranómetro patrón.

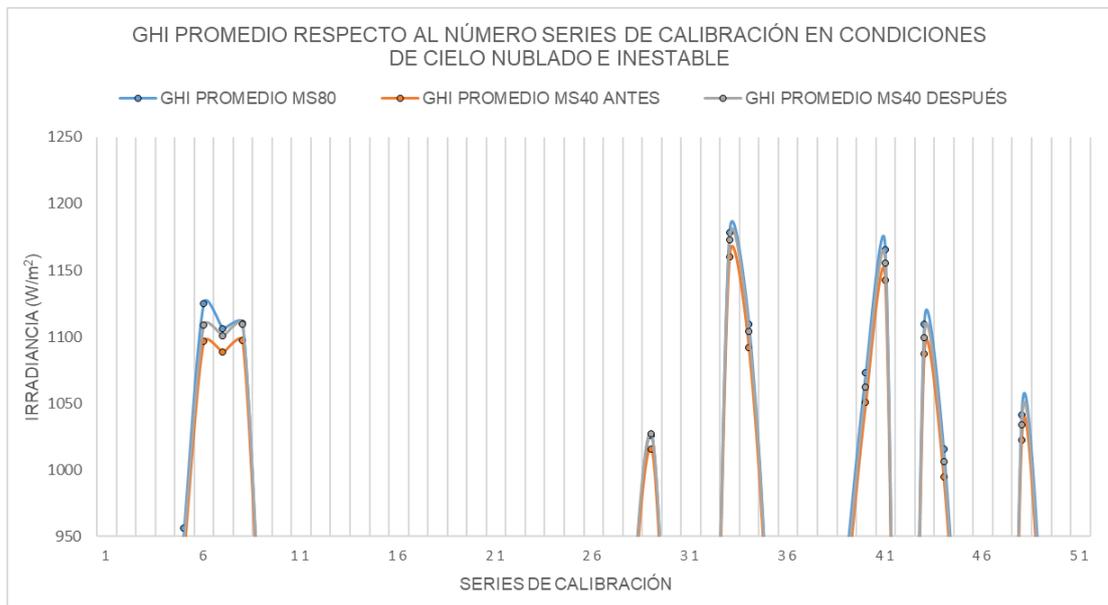
Es importante mencionar que, la pequeña diferencia entre los coeficientes  $R^2$  de las circunferencias antes y después del proceso, sucede porque las circunferencias de color naranja se encuentran centradas de mejor forma a su línea de tendencia. Mientras que, las circunferencias de color plateado después de realizar el proceso de calibración se encuentran un poco dispersas de su línea de tendencia.

De manera de complemento, en las Figuras 3.13 y 3.14 se logra apreciar las mediciones de GHI promedio versus el número de series de medición. Donde, la curva de color plateado que representa la irradiancia promedio del piranómetro de prueba después del proceso de calibración, logra ajustarse correctamente a la curva del piranómetro patrón de color azul. En cambio, la curva de color naranja que representa la medida de irradiancia

del instrumento de prueba antes del proceso de calibración, presenta un mayor desajuste con la curva de referencia.



**Figura 3.13.** GHI promedio respecto al número de series de medición en condiciones de cielo nublado e inestable



**Figura 3.14.** Acercamiento para verificar el desajuste de la Figura 3.13

Por lo tanto, con el factor de calibración final del primer proceso de calibración, el piranómetro de prueba logra ajustarse a la medida del piranómetro patrón.

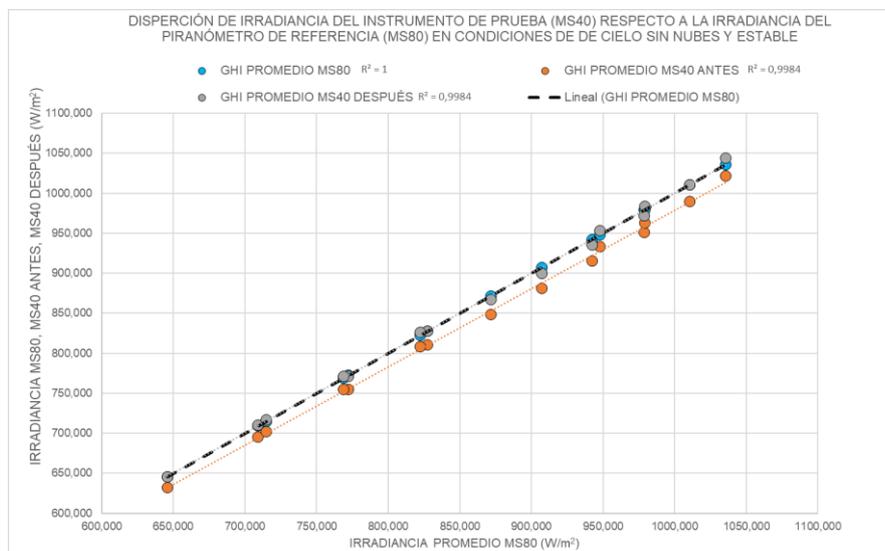
### 3.1.6 Dispersión de la Irradiancia respecto a la medida del instrumento patrón en condiciones de cielo sin nubes y estable

De igual manera, en el Figura 3.15, se apreciar una comparativa entre la irradiancia promedio del piranómetro de prueba respecto a la medida promedio del piranómetro de patrón, antes y después del proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable.

Donde, la línea entre cortada y los círculos de color azul representan la línea de referencia en la medida. De igual forma, esta línea tiene una correlación directa positiva con un coeficiente de determinación  $R^2 = 1$ .

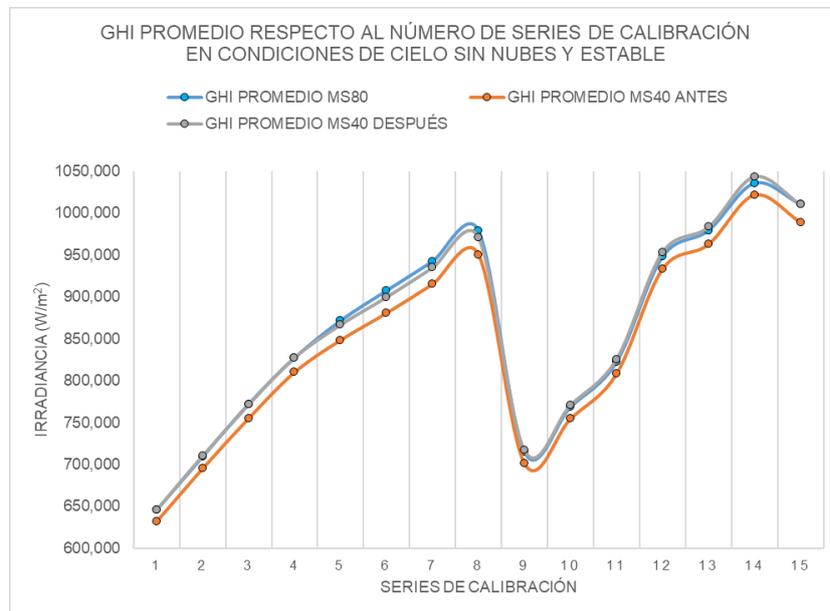
En comparación, los círculos y líneas de color naranja representan la medida del instrumento de prueba antes del proceso de calibración. Donde, estos círculos poseen una correlación directa positiva con un  $R^2 = 0,9984$ , sin ajustarse a la línea de referencia.

Sin embargo, los círculos y líneas de color plateado representan la medida del instrumento de prueba después del proceso de calibración. Donde se observa un ajuste con línea de referencia, con una tendencia directa positiva y un  $R^2 = 0,9984$ .



**Figura 3.15.** Dispersión de la irradiancia del piranómetro de prueba respecto a la irradiancia del piranómetro patrón, en condiciones de cielo sin nubes y estable

Por último, en la Figura 3.16 se compara las mediciones de GHI promedio versus al número de series de medición. Donde, la curva de color plateado ilustra la medida de irradiancia del piranómetro de prueba después del proceso de calibración, presentando un ajuste con la curva de color azul que simboliza la referencia en la medida.



**Figura 3.16.** GHI promedio respecto al número de series de medición en condiciones de cielo sin nubes y estable

Por lo tanto, con el factor final del segundo proceso de calibración, el piranómetro de prueba también logra ajustarse a la medida del piranómetro patrón.

### 3.1.7 Comparación de los dos procesos de calibración en diferentes condiciones de cielo.

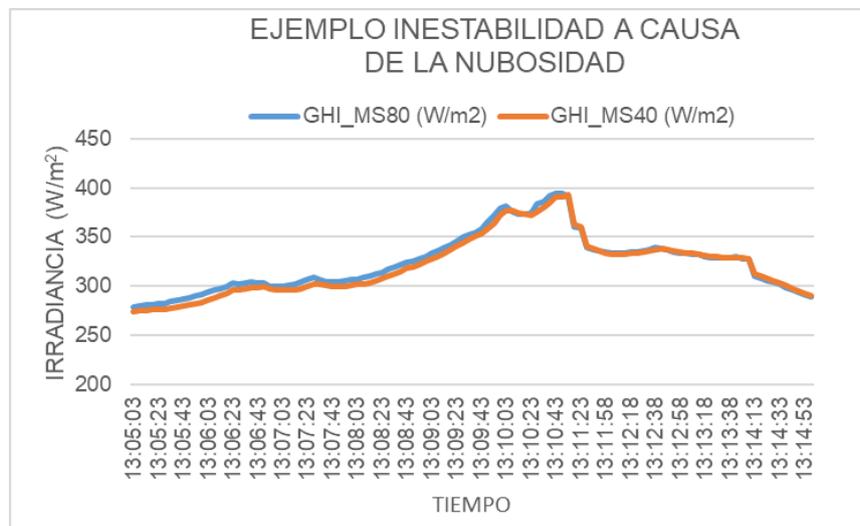
A manera de resumen, en el primero proceso de calibración en condiciones de cielo nublado e inestable, se obtuvo un factor de calibración final de 81,750 ( $W/m^2 \cdot mV$ ). En cambio, en el segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable, se encontró un factor de calibración final de 82,592 ( $W/m^2 \cdot mV$ ).

Comparando estos factores de calibración, se puede notar una diferencia de 0,842 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), provocando diferencias teóricas entre las medidas de irradiancia no superiores a los 8,5 ( $W/m^2$ ).

Es preciso mencionar, que las variaciones de los factores de calibración final, se debe a las condiciones en las se desarrolló el proceso. Por ejemplo, en condiciones de cielo nublado, los factores de calibración por serie  $F(j)$  varían al menos 0,647 ( $W/m^2 \cdot mV$ ) del valor medio. Estas variaciones suceden por el efecto de las condiciones inestables que tiene cada serie de medición, a causa de los cambios repentinos y bruscos en las

mediciones de irradiancia por la presencia de nubes alrededor del sol. En la Figura 3.17 se logra observar estos cambios significativos.

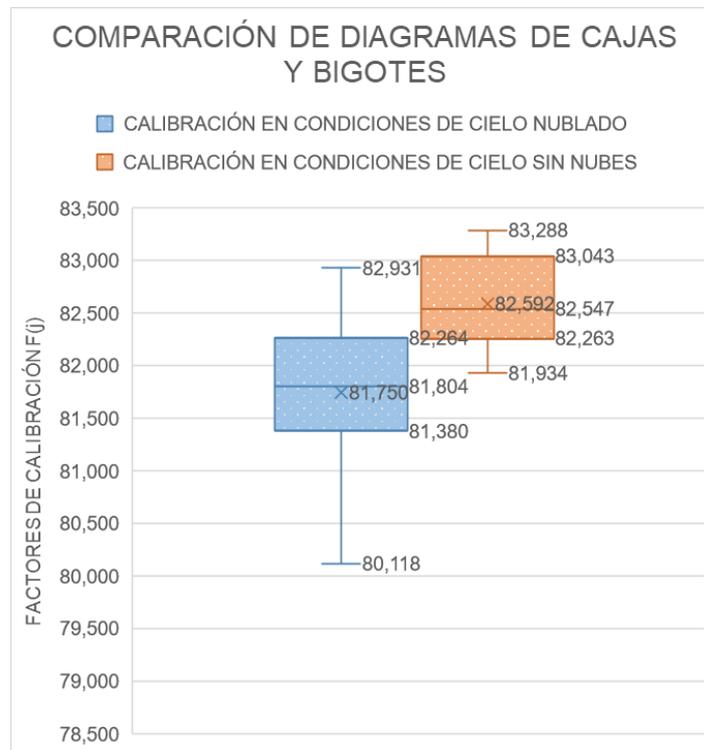
Además, cuando se presentaban estas condiciones de cielo en una serie de medición, en ciertos periodos de tiempo, la lectura del piranómetro patrón llega a ser superior a la de prueba. Mientras que, en otros instantes la lectura del piranómetro patrón es igual o inferior a la lectura del piranómetro de prueba. Provocando que los factores de calibración  $F(j)$  lleguen a tener valores inferiores al factor original del piranómetro de prueba, el cual es 80,84 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), así obteniendo mayor variabilidad en los factores de calibración por serie.



**Figura 3.17.** Ejemplo de inestabilidad a causa de la nubosidad

En cambio, en el segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes, los factores de calibración por serie  $F(j)$  varían al menos 0,428 ( $W/m^2 \cdot mV$ ) alrededor de su valor medio. Incrementando su estabilidad en el proceso y disminuyendo la variabilidad de los factores por serie cuando no existe nubosidad alrededor del sol.

Por otra parte, en la Figura 3.18 se podrá realizar una comparativa del comportamiento y tendencia de los factores de calibración  $F(j)$  en los dos procesos de calibración.



**Figura 3.18.** Comparación de diagramas de cajas y bigotes

Como análisis, el diagrama con mayor concentración de datos alrededor de su valor medio es el de color naranja, que simboliza el segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes con un rango intercuartil de 1,294 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), logrando tener menor variabilidad de los factores  $F(j)$  en el proceso de calibración.

Adicionalmente, el diagrama de cajas y bigotes en condiciones de cielo nublado presenta una asimétrica negativa indicando que la mayor concentración de datos se encuentra entre el segundo y tercer cuartil, como se mencionó anteriormente. En cambio, en el segundo diagrama en condiciones de cielo sin nubes, se observa una asimetría positiva indicando una mayor concentración de datos en el primer y segundo cuartil.

Por lo tanto, a medida que se incremente el número de series de mediciones en los procesos de calibración, el factor de calibración final tiende a concentrarse entre la mediana del primer diagrama ( $81,8 W/m^2 \cdot mV$ ) hasta la mediana del segundo diagrama ( $82,5 W/m^2 \cdot mV$ ). Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta la estabilidad en el proceso de calibración y los factores externos que pueden variar el factor de calibración final, como por

ejemplo; las interferencias de señal producidas por fuentes de alimentación, por la ubicación geográfica y temporada del año.

Parte terminar, con los dos procesos de calibración se realizó un ajuste en la medida del piranómetro de prueba respecto al piranómetro patrón. Donde, el segundo proceso obtuvo una mayor reducción del error "RMSE" de 1,607 %, en comparación al obtenido en el primer proceso con un valor de 0,375%.

Sin embargo, con el análisis de error "MBE" se comprobó que en los dos procesos, la medida del instrumento de prueba tiende a variar con la medida del piranómetro patrón, es decir, en ciertos instantes las mediciones de estos dos instrumentos no son iguales. Debido a esto, el segundo proceso de calibración se ajusta de mejor manera a estas variaciones en la media, obteniendo errores en magnitud no mayores a 0,8%.

### **3.2 Conclusiones**

A lo largo del desarrollo de este documento se puso en marcha una serie de actividades para comprender el proceso de calibración de piranómetros, entre ellas; la lectura e interpretación de la norma ISO 9847, la consulta de conceptos importantes relacionados a la radiación solar, metrología, meteorología, etc. Además, se desarrolló una etapa de experimentación, consiguiendo una fuerte base en prácticas de instrumentación y calibración.

Producto de estas actividades, se recolectaron diversas recomendaciones y lineamientos de calibración sugeridas por la norma ISO 9847, las cuales se redactaron de forma resumida y esquematizada en un manual de calibración de piranómetros.

Durante la experimentación, se llevó a cabo dos procesos de calibración con el método en exteriores (tipo Ia), consiguiendo como resultado dos factores de calibración. En el primero proceso se obtuvo un factor de calibración de 81,750 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), desarrollado a lo largo de 11 días en condiciones de cielo nublado e inestable. En cambio, en el segundo proceso se obtuvo un factor de calibración de 82,592 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), desarrollado en un periodo de 3 días en condiciones de cielo sin nubes y estable.

Adicionalmente, se comprobó que existe un ajuste entre la medida del piranómetro de prueba con la medida del piranómetro patrón en los dos procesos de calibración. Consiguiendo para el primer proceso de calibración, una reducción del error "RMSE" de 0,375%. Y para el segundo proceso, una reducción de 1,607%. Por lo tanto, con el segundo proceso de calibración, desarrollado en condiciones de cielo sin nubes y estable, se

consigue mayor ajuste a la medida del instrumento de referencia en un menor tiempo de calibración.

Cabe recalcar, dependiendo de la ubicación geográfica y temporada del año, las condiciones de cielo sin nubes y estable son difíciles de observar. Sin embargo, las condiciones de cielo nublado e inestable se pueden observar con mayor frecuencia, especialmente en la ciudad Quito-Ecuador, pero necesitando más de diez días y 50 series de medición para acercarse al factor de calibración obtenido en condiciones de cielo sin nubes y estable.

Por otro lado, la diferencia que existe entre estos dos factores de calibración se debe a las condiciones de cielo en las que se obtuvieron. Por ejemplo, en condiciones de cielo nublado e inestable, la variabilidad de la nubosidad causa gran parte de la inestabilidad en la medición, provocando que los factores de calibración  $F(j)$  varíen más alrededor de su valor medio. No obstante, en condiciones de cielo sin nubes y estable, la presencia de nubosidad alrededor del sol era casi escasa, aumentando la estabilidad en las series de medición consiguiendo factores de calibración  $F(j)$  mayormente centrados alrededor de su valor medio.

Cabe recalcar, la estabilidad total de calibración en los dos procesos es relativamente baja respecto a las estabilidades que manejan los procesos de calibración con el método en interiores (tipo II). Por tal motivo, el método en interiores es el más usado en los laboratorios de calibración a nivel mundial, debido a su corto proceso de calibración y altas tasas de estabilidad sin depender de factores externos como la nubosidad.

Como en Ecuador no existen estos laboratorios que realicen el proceso de calibración en interiores. Una alternativa confiable y precisa es el método de calibración en exteriores (tipo Ia), el cual se adapta a las condiciones reales que posee el lugar de calibración, y sobre todo la medida del piranómetro de prueba se ajusta con la medida del piranómetro patrón.

### **3.3 Recomendaciones**

La instalación de la mesa de calibración tiene que estar perfectamente ubicada para que ningún objeto a su alrededor provoque sombra.

Es recomendable observar la compatibilidad de los piranómetros con el data logger, puesto que varios de estos dispositivos no tienen la resolución necesaria para captar señales muy pequeñas como la de estos instrumentos.

Todas las instalaciones de alimentación de los equipos, en especial la del data logger, deben estar suministradas por una fuente DC, acorde a lo que especifica en sus

características técnicas. No se recomienda usar fuentes de alimentación AC, debido a que producen ruidos en la lectura del data logger, interfiriendo con el proceso de calibración.

Para trabajos futuros se recomienda ampliar los números de series de calibración para cada proceso. Con el fin de observar la tendencia de los factores de calibración por serie respecto con el factor de calibración final en cada proceso de calibración.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «RADIACIÓN SOLAR - IDEAM». Accedido: 18 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>
- [2] Vaca Diego y Ordóñez Freddy, «Mapa\_Solar\_del\_Ecuador\_2019», Accedido: 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://meteo-scinerger.epn.edu.ec/mapa-solar>
- [3] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [4] «INTERNATIONAL STANDARD ISO 9060 Second edition Solar energy- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation Énergie solaire-Spécification et classification des instruments de mesurage du rayonnement solaire hémisphérique et direct», 2018.
- [5] «INTERNATIONAL STANDARD ISO 9847 “First edition Solar energy-Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”», 1992.
- [6] «Fusión nuclear - CSN». Accedido: 8 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/fusion-nuclear>
- [7] Yunus A.Çengel y Afshin J. Ghajar, «Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones-Mc Graw Hill (2011)».
- [8] «PIRANÓMETRO\_ms-80-80s-80u-manual», Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eko-instruments.com/media/luufdy1v/ms-80-80s-80u-manual.pdf>
- [9] «PIRANÓMETRO\_ms-40\_40 manual», Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.eko-instruments.com/media/nbljpwdg/ms-40\\_40s\\_manual20231013v8.pdf](https://www.eko-instruments.com/media/nbljpwdg/ms-40_40s_manual20231013v8.pdf)
- [10] A. E. Esquivel, «Metrología y sus aplicaciones».
- [11] «Organismos de Metrología - INDOCAL». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://indocal.gob.do/areas-tecnicas/metrologia/organismos-de-metrologia/>
- [12] «Metrología INEN : junio 2023». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://inenmetrologia.blogspot.com/2023/06/>
- [13] «INEN al servicio de un país de calidad – Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/inen-al-servicio-de-un-pais-de-calidad/>
- [14] «¿Conocés el INTI? | Argentina.gob.ar». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/inti/conoces-el-inti>
- [15] «El Centro Nacional de Metrología de México, referente internacional en materia de mediciones | Secretaría de Economía | Gobierno | gob.mx». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/se/articulos/el-centro-nacional-de-metrologia-de-mexico-referente-internacional-en-materia-de-mediciones-198234>

- [16] «1. Resolución 17 071 Reglamento Redes Metrología RO 969 2017.03.23 (1)», Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/direccion-tecnica-de-metrologia/>
- [17] L. Nacionales, «SISTEMA NACIONAL DE CALIBRACIÓN Y REDES METROLÓGICAS». Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/direccion-tecnica-de-metrologia/>
- [18] C. DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN CMCs, T. DE EM David Muñoz V Sr Edison Safla Laboratorio, L. Kennedy, y A. de, «NRO. RUC LABORATORIO REPRESENTATE LEGAL/ GERENTE CONTACTO DIRECCIÓN TELÉFONO CONVENCIONAL CORREO ELECTRÓNICO RESOLUCIÓN FECHA DE DESIGNACIÓN PAGINA WEB MAGNITUD», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://cmee.mil.ec/>
- [19] «2. Listado de Laboratorios Miembros Sistema Nacional de Calibración 2023», Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/direccion-tecnica-de-metrologia/>
- [20] «Laboratorio – Grupo de Investigación Antártica». Accedido: 11 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://antarctica.cl/laboratorio/>
- [21] «About». Accedido: 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.eko-instruments.com/us/about>
- [22] «Kipp & Zonen Customer Service - Kipp & Zonen». Accedido: 8 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.kippzonen.com/Customer-Services/Kipp-Zonen-Customer-Service>
- [23] «¿Cómo funcionan las placas solares para producir electricidad?» Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cambioenergetico.com/blog/como-funcionan-placas-solares/>
- [24] «El papel del diseño solar pasivo en la calefacción energéticamente eficiente». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://energy5.com/es/el-papel-del-diseno-solar-pasivo-en-la-calefaccion-energeticamente-eficiente>
- [25] «Diseño Solar Pasivo - Aberlux Arquitectura Sustentable». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [http://www.aberlux.com/novedades/2015/disenio\\_solar\\_pasivo.html](http://www.aberlux.com/novedades/2015/disenio_solar_pasivo.html)
- [26] «Significado de Meteorología (Qué es, Concepto y Definición) - Significados». Accedido: 11 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.significados.com/meteorologia/>
- [27] «Valores / Misión / Visión – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología». Accedido: 11 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.inamhi.gob.ec/valores-mision-vision/>
- [28] «Radiación UV - Especiales CDC - CDC en Español». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html>
- [29] «Advertencia del INAMHI: Aumento de temperaturas y radiación UV en Ecuador - El Notición». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en:

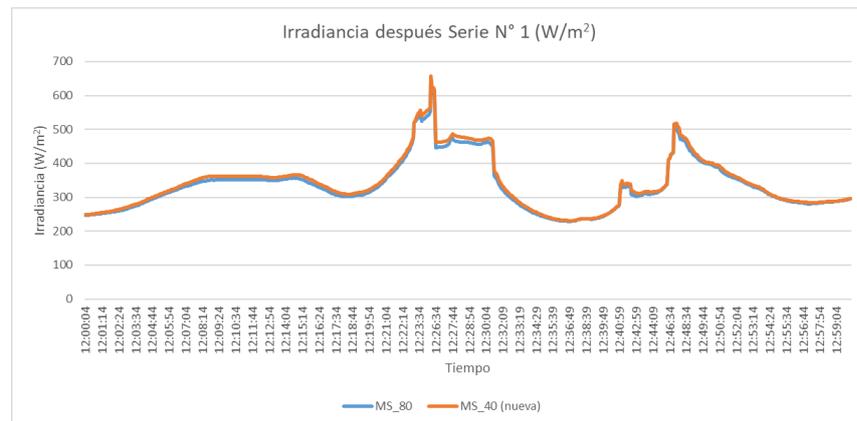
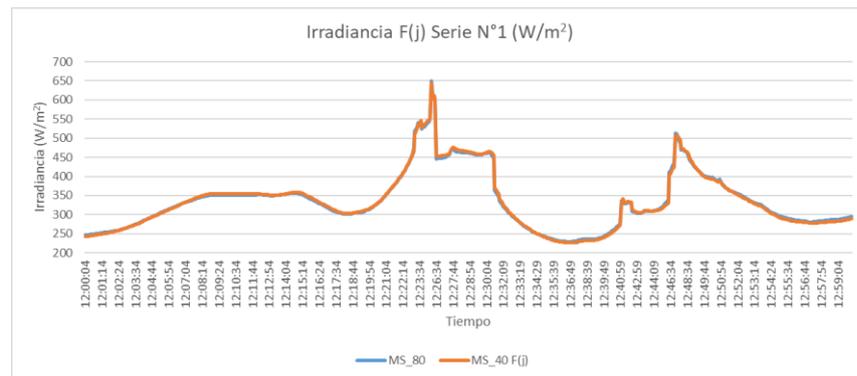
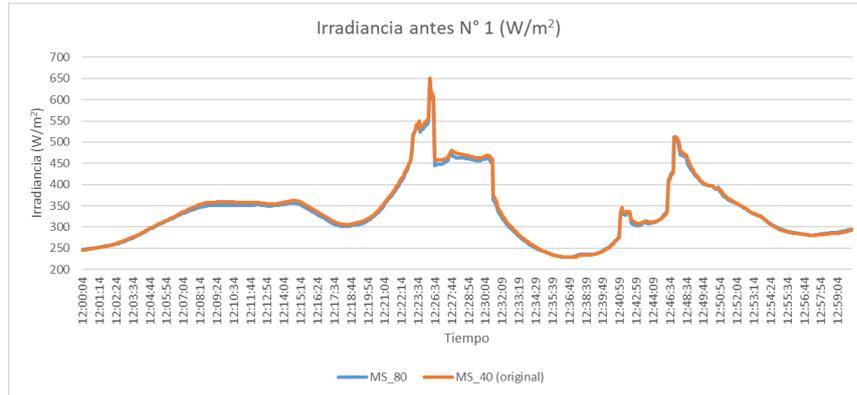
<https://elnoticion.info/advertencia-del-inamhi-aumento-de-temperaturas-y-radiacion-uv-en-ecuador/>

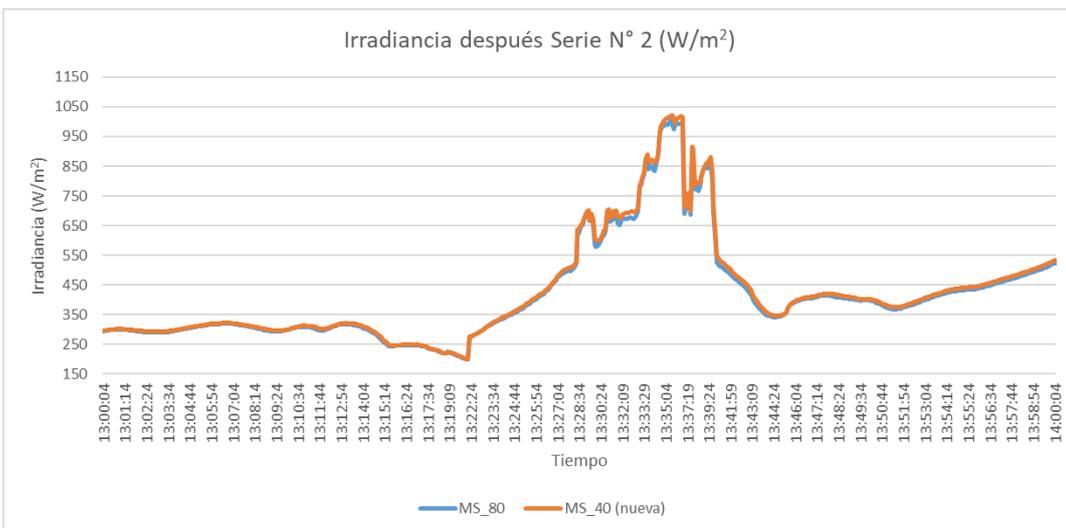
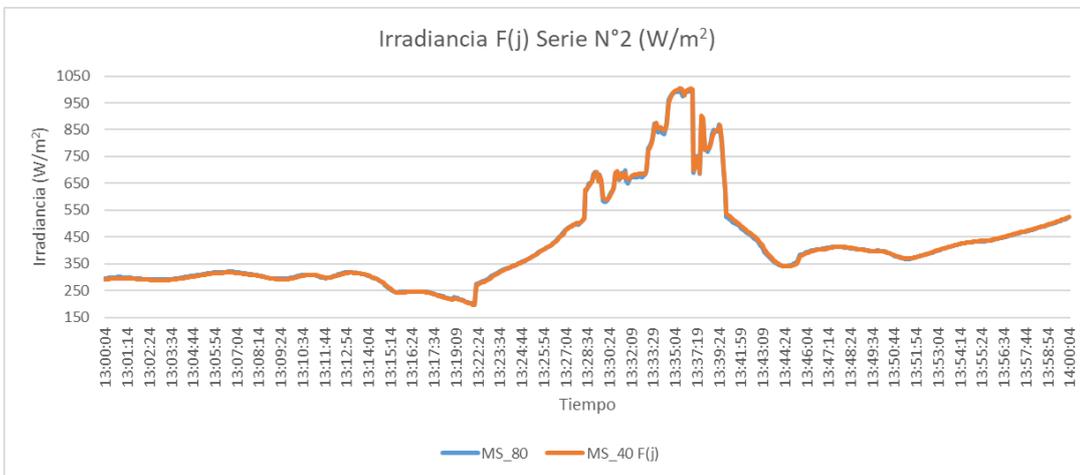
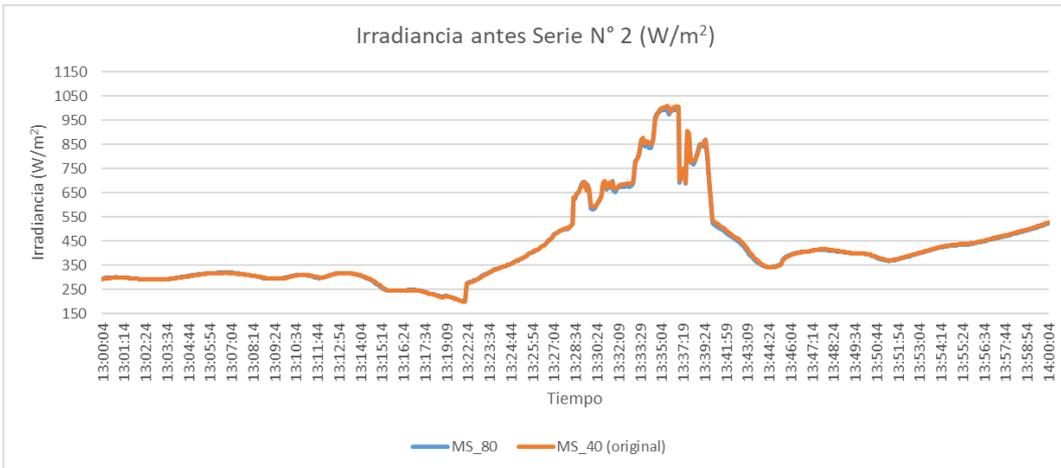
- [30] «Pronóstico Radiación Ultravioleta». Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inamhi.gob.ec/pronostico/radiacion.pdf>
- [31] F. Ordóñez, D. Vaca-Revelo, y J. López-Villada, «Assessment of the Solar Resource in Andean Regions by Comparison between Satellite Estimation and Ground Measurements: Study Case of Ecuador», *J Sustain Dev*, vol. 12, n.º 4, p. 62, jul. 2019, doi: 10.5539/jsd.v12n4p62.
- [32] «ISO - About us». Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/about-us.html>
- [33] «ISO 9847:2023 - Solar energy — Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/88/78800.html?browse=tc>
- [34] «ISO - Benefits of ISO standards». Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/benefits-of-standards.html>
- [35] «E824 Standard Test Method for Transfer of Calibration From Reference to Field Radiometers». Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/e0824-10r18e01.html>
- [36] «INTERNATIONAL STANDARD ISO 9846 “Solar energy- Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter”», 1993.
- [37] Y. Registro, «NOVUS AUTOMATION 2/76», Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.novus.com.br/downloads/arquivos/v10x\\_b\\_manual\\_fieldlogger\\_spanish\\_a4.pdf](https://www.novus.com.br/downloads/arquivos/v10x_b_manual_fieldlogger_spanish_a4.pdf)

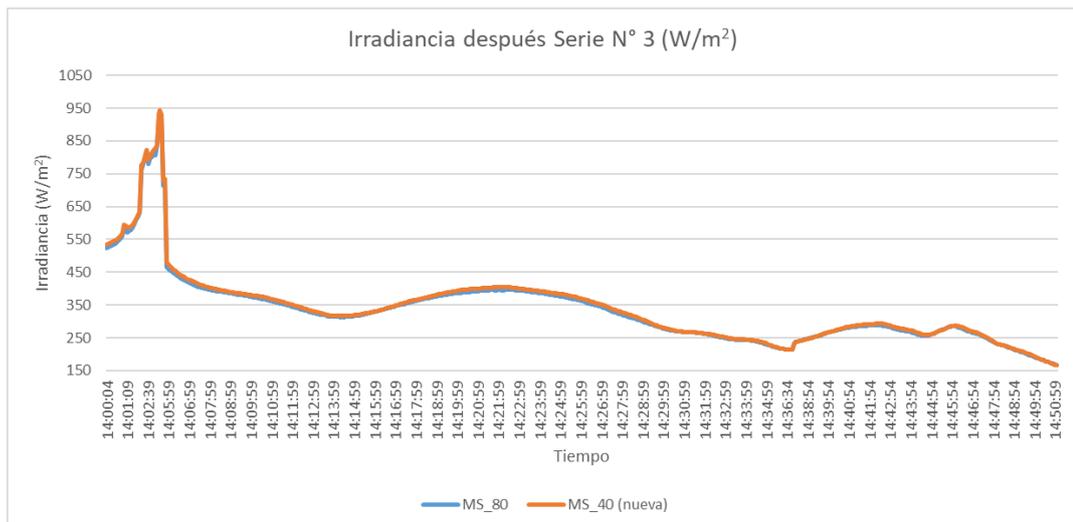
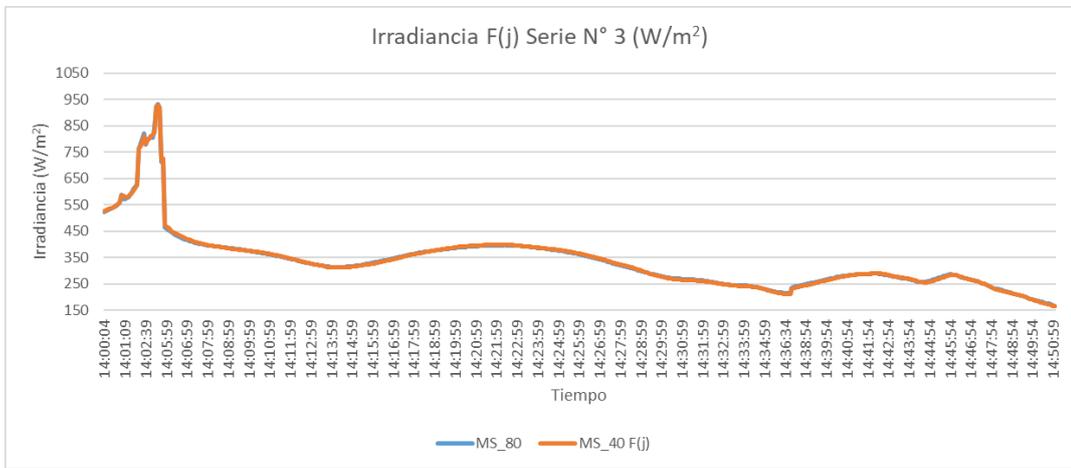
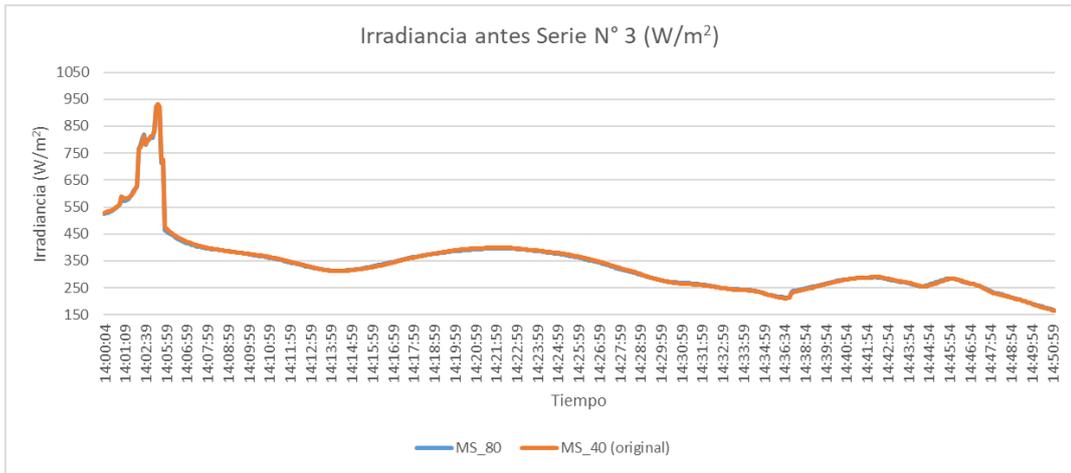
## 5. ANEXOS

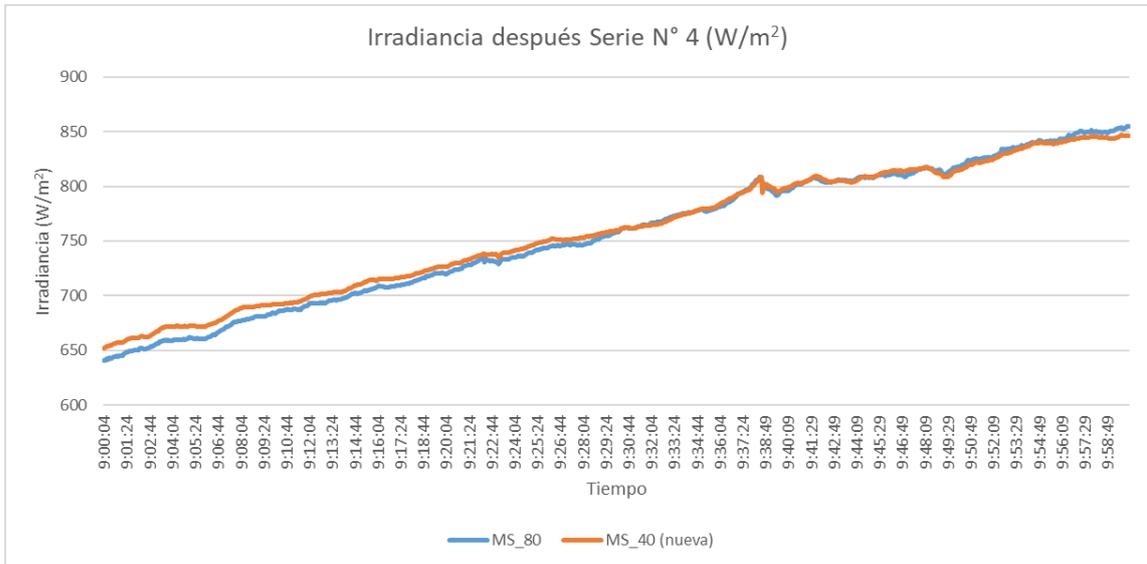
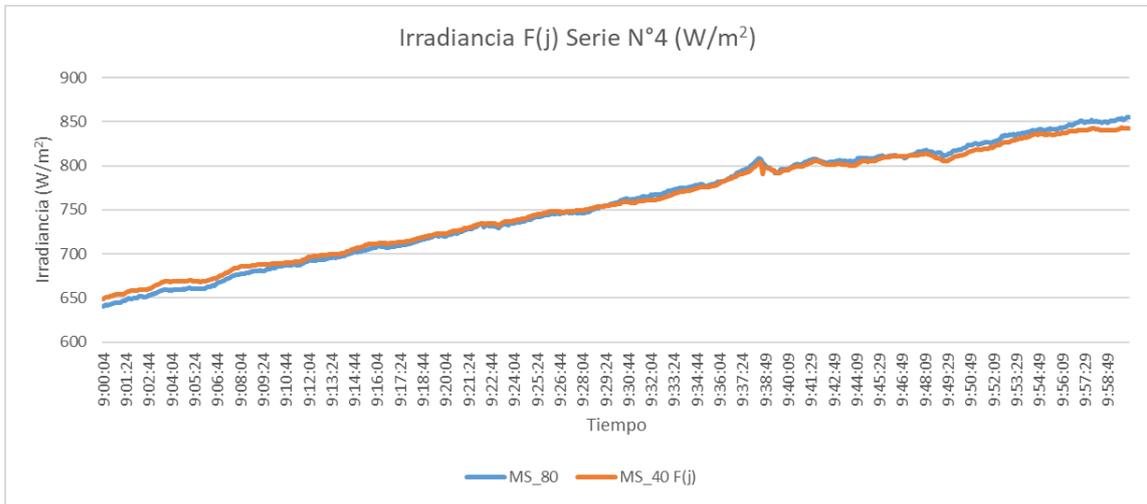
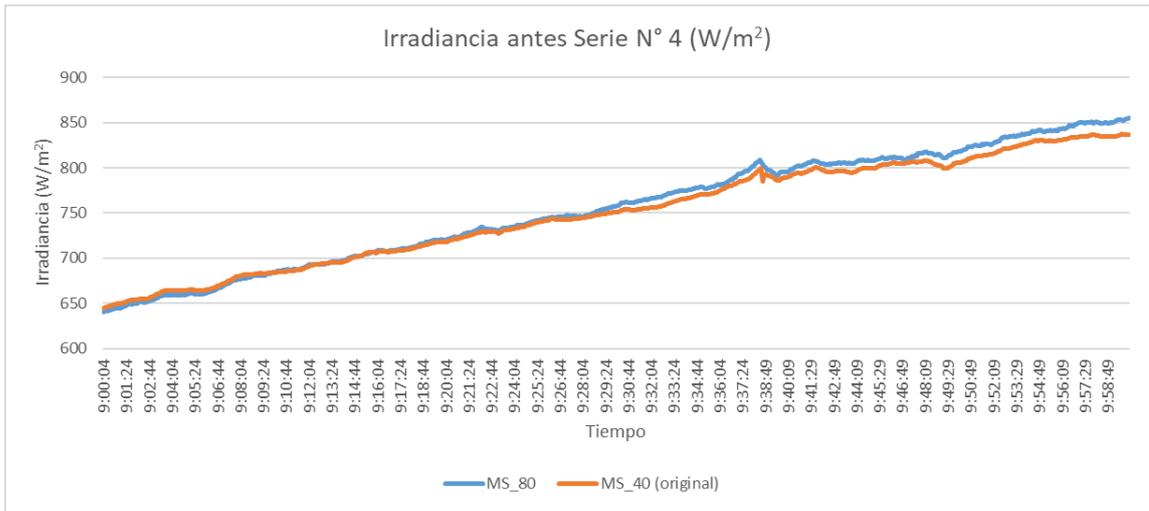
### ANEXO I. GRÁFICAS COMPARANDO LA IRRADIANCIA ANTES, PARA CADA F(J) Y DESPUÉS DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

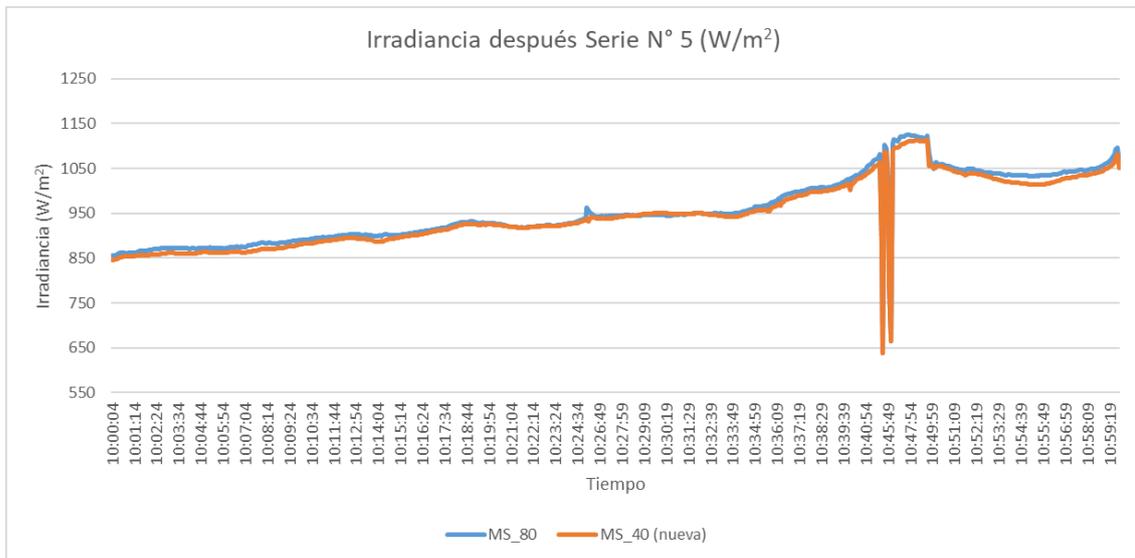
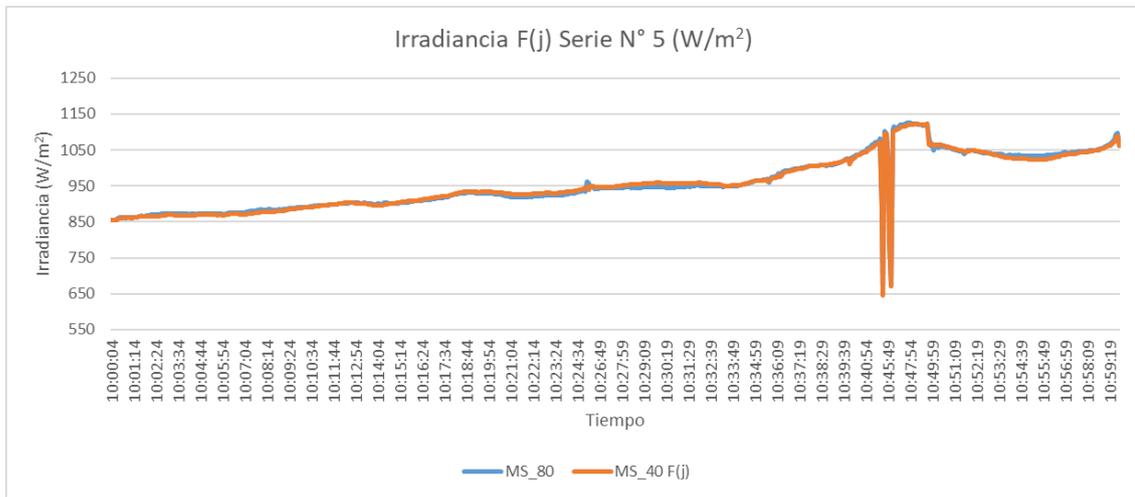
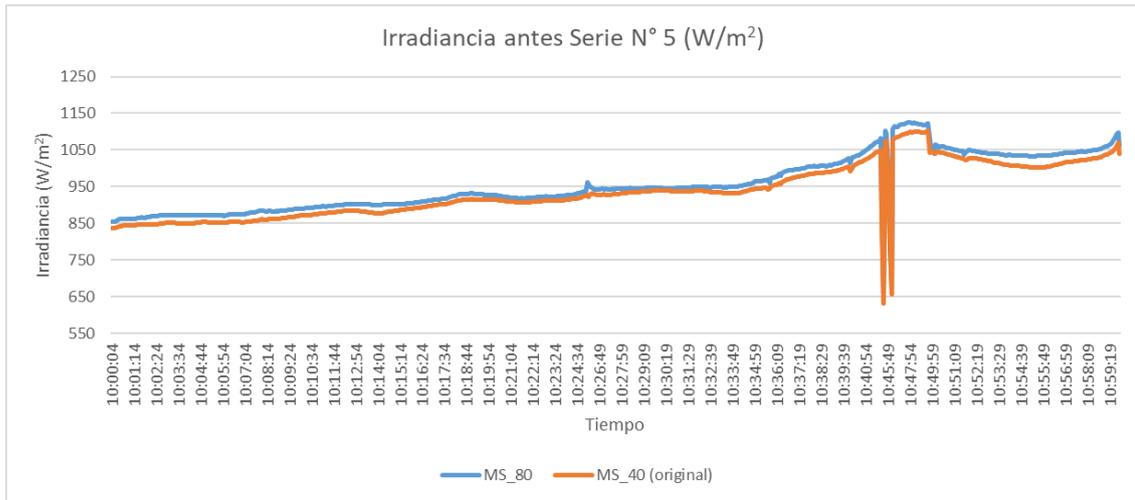
- GRÁFICAS EN CONDICIONES DE CIELO NUBLADO E INESTABLE

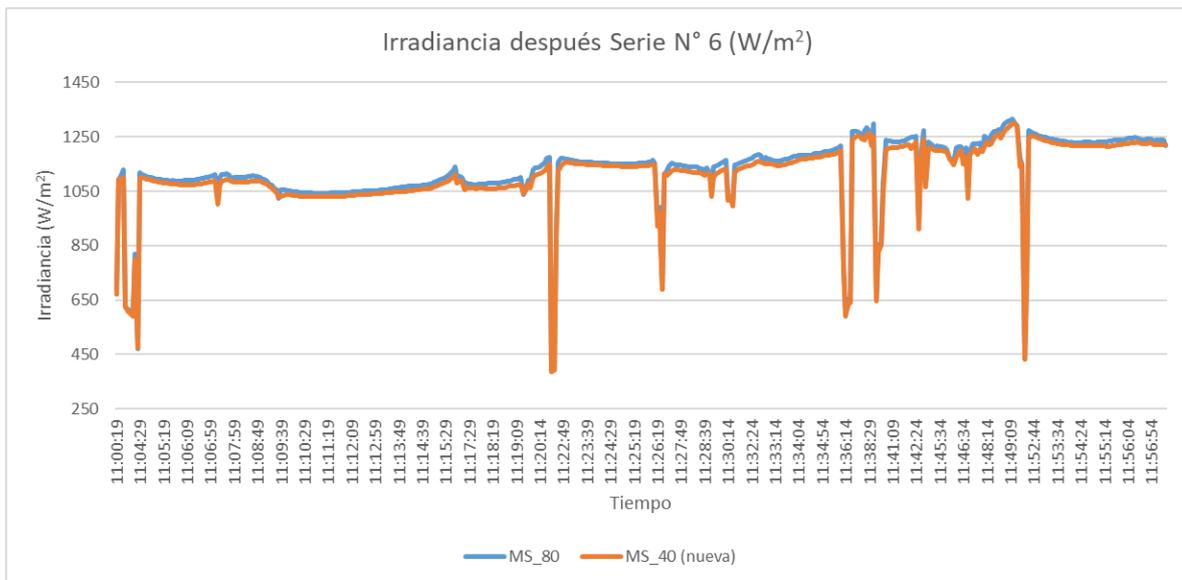
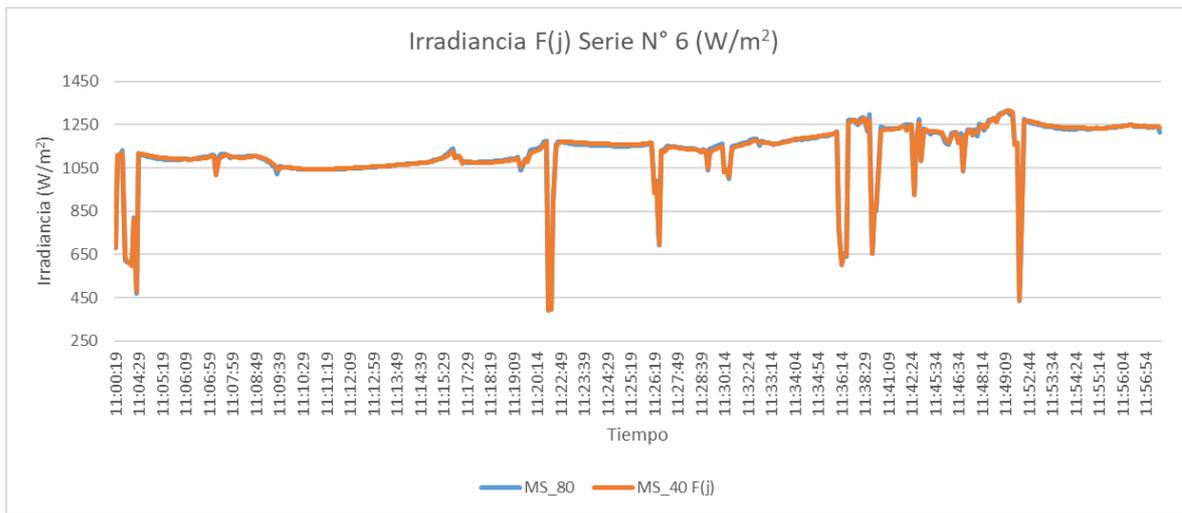
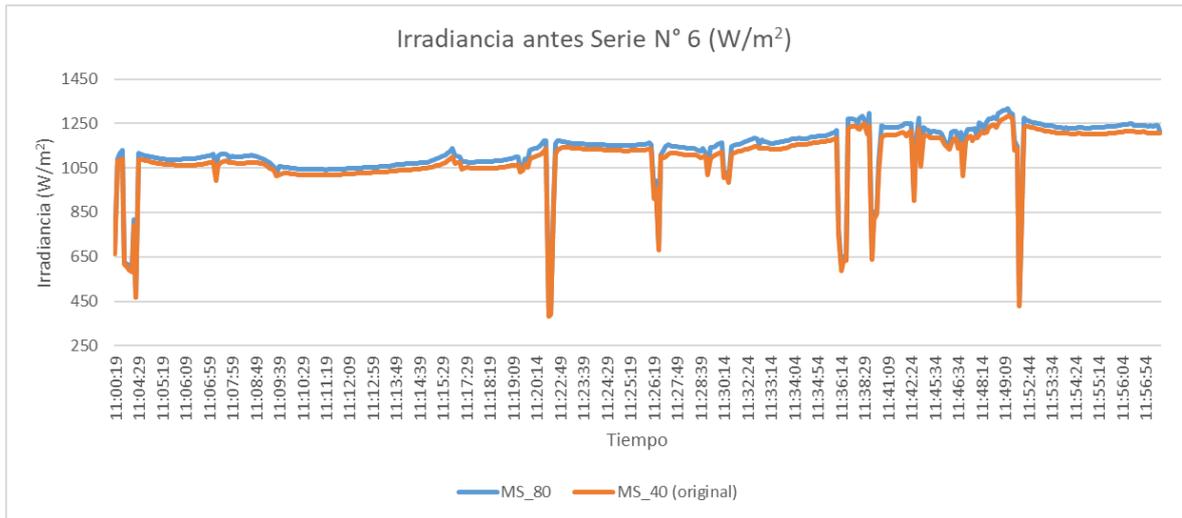


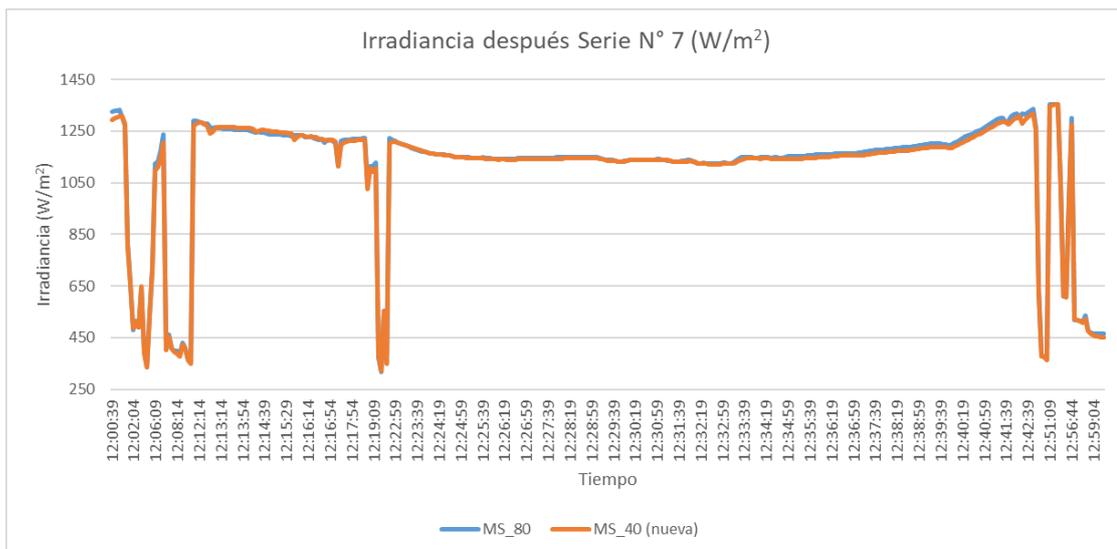
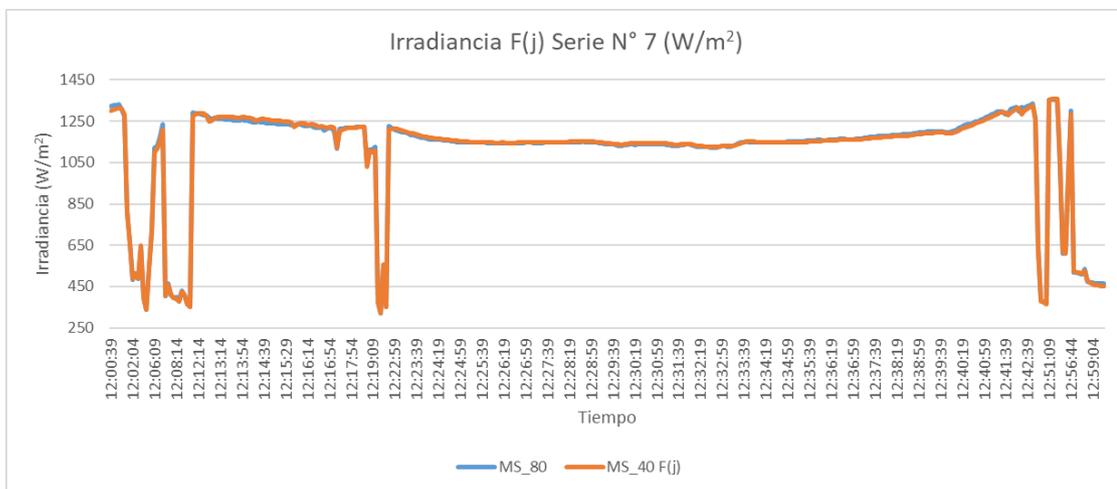
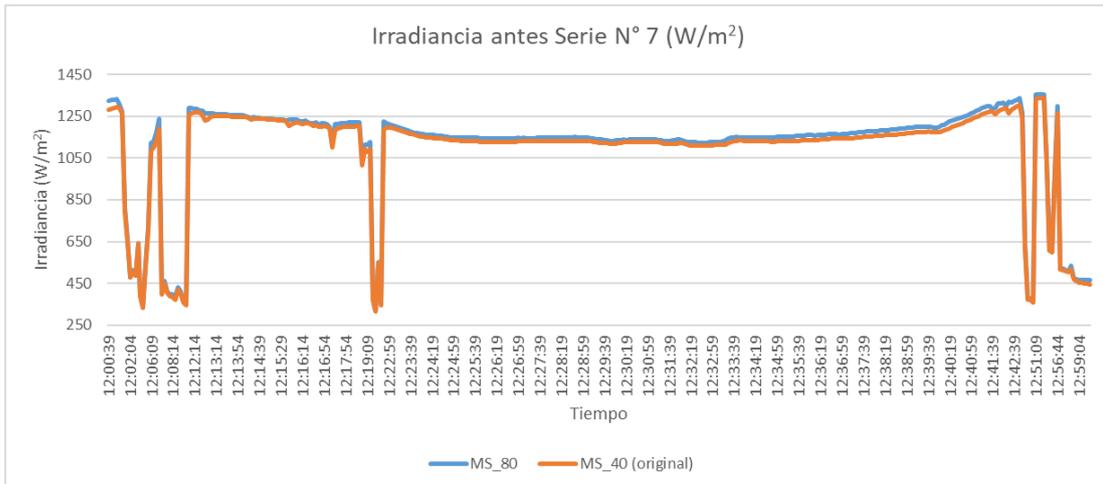


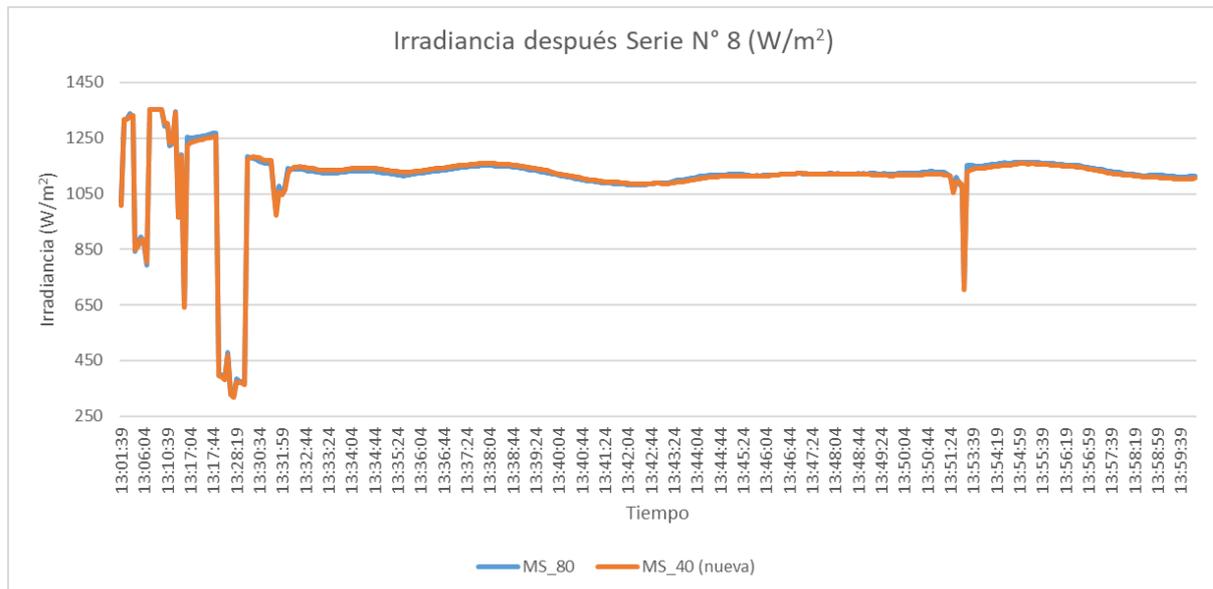
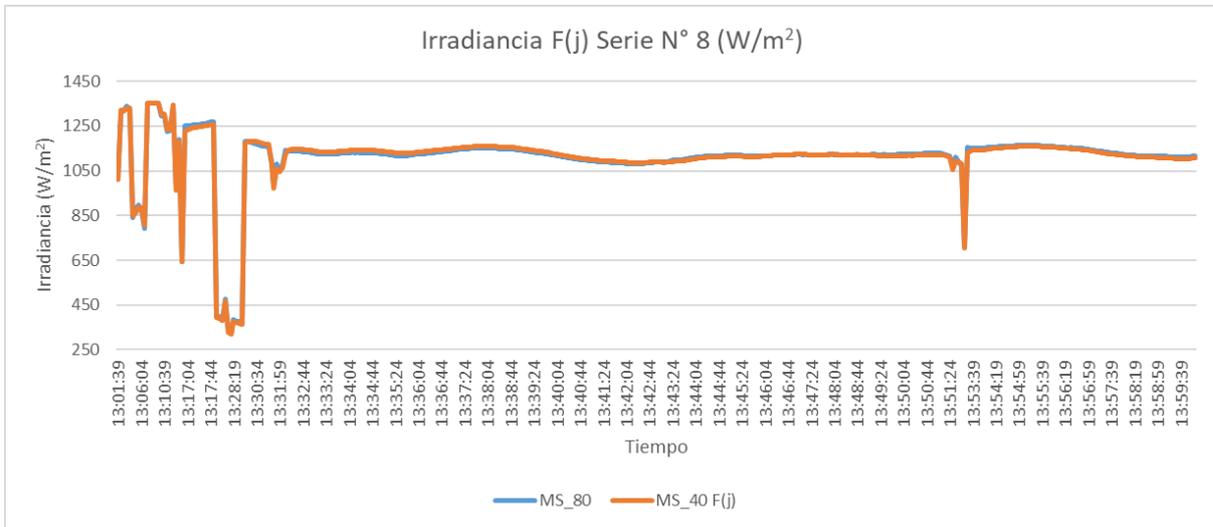
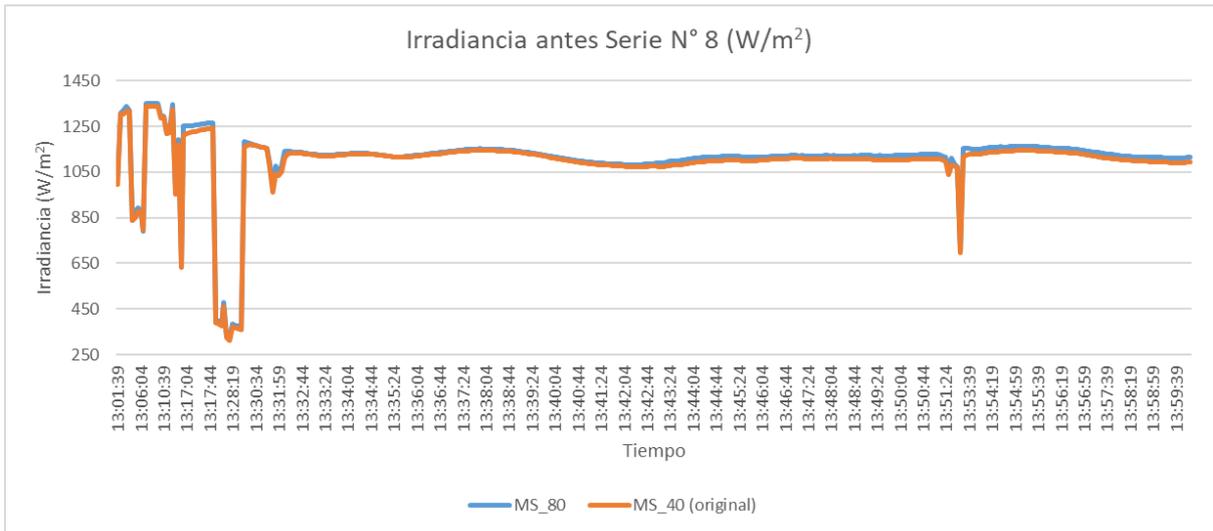


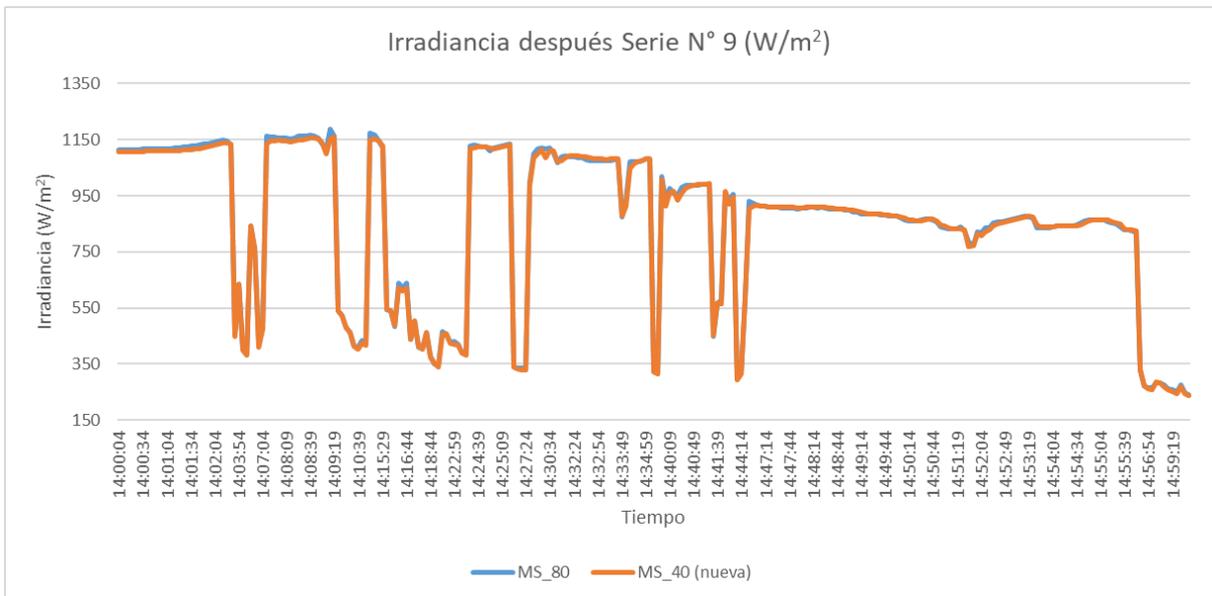
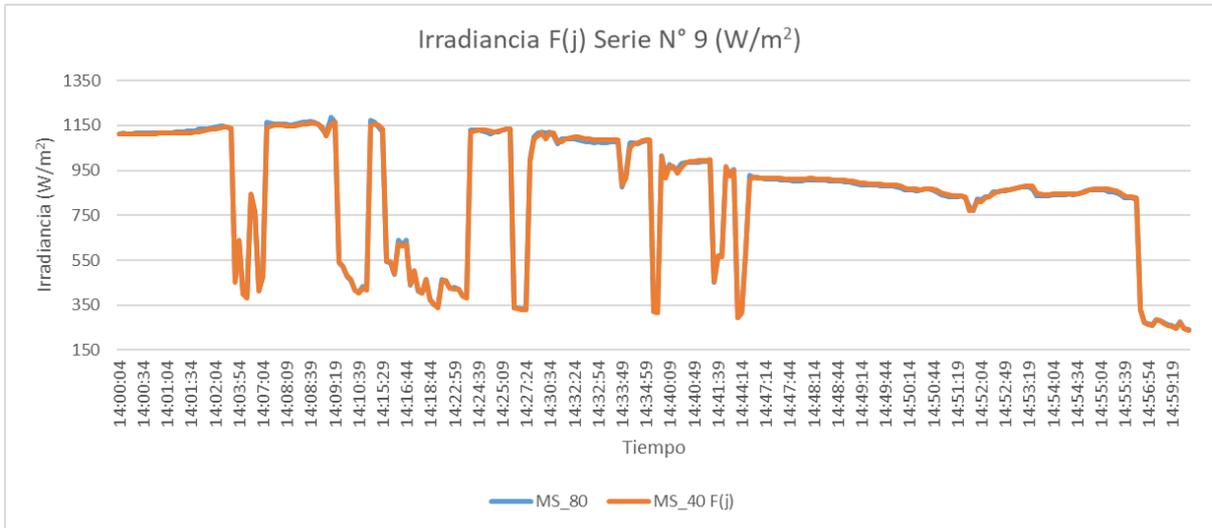
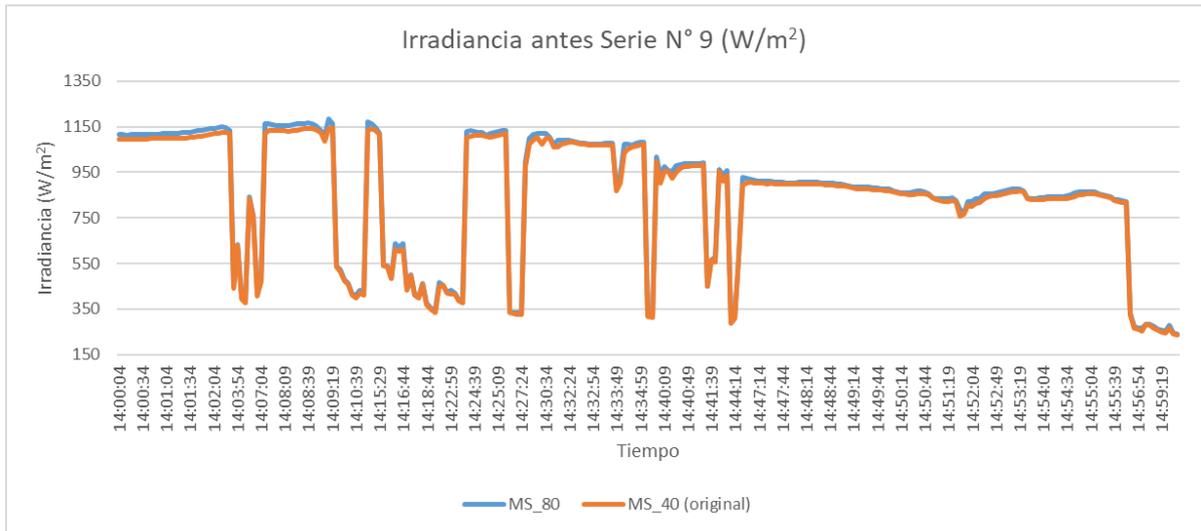


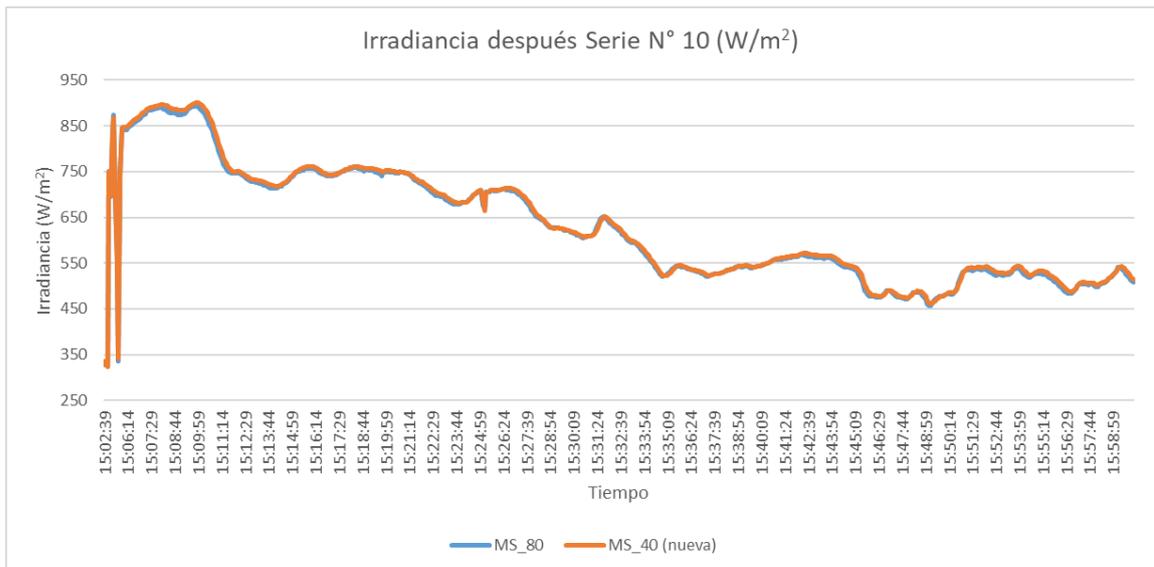
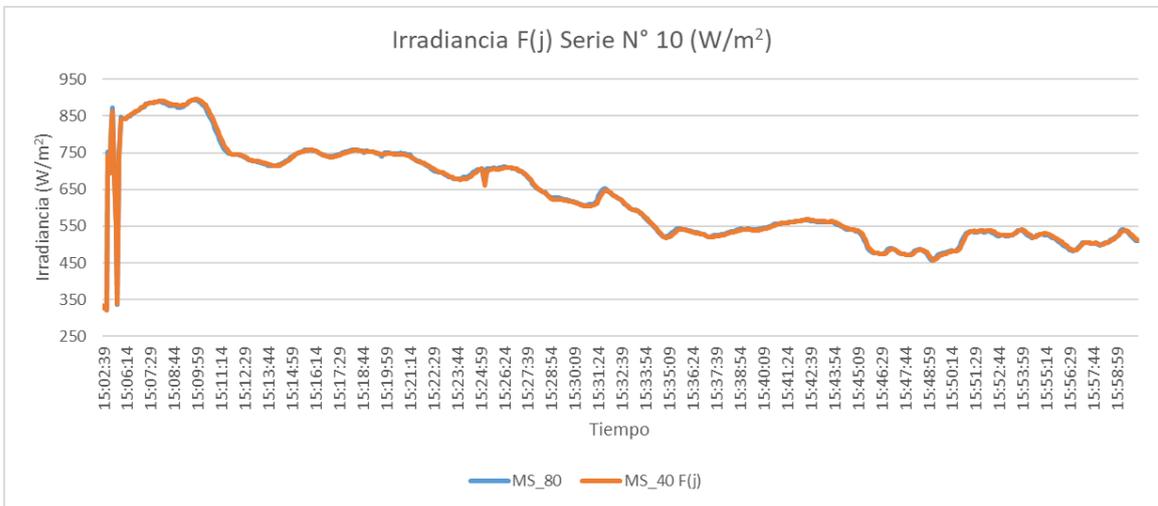
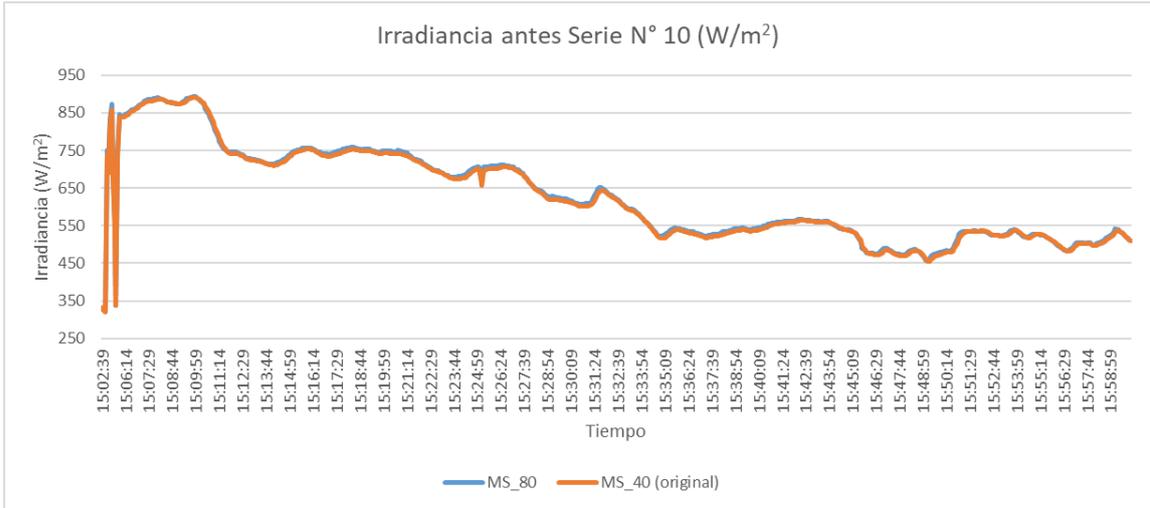


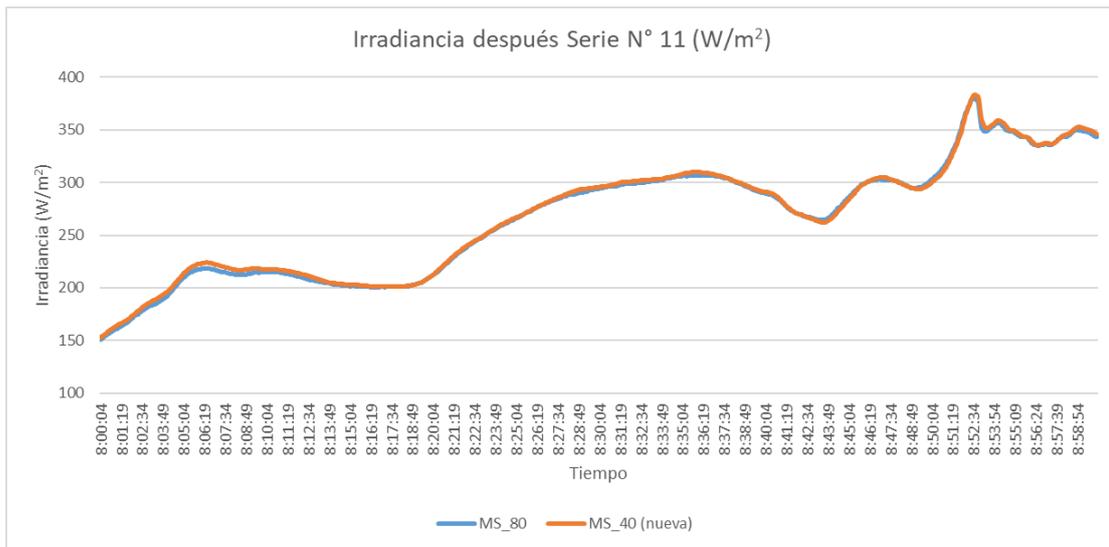
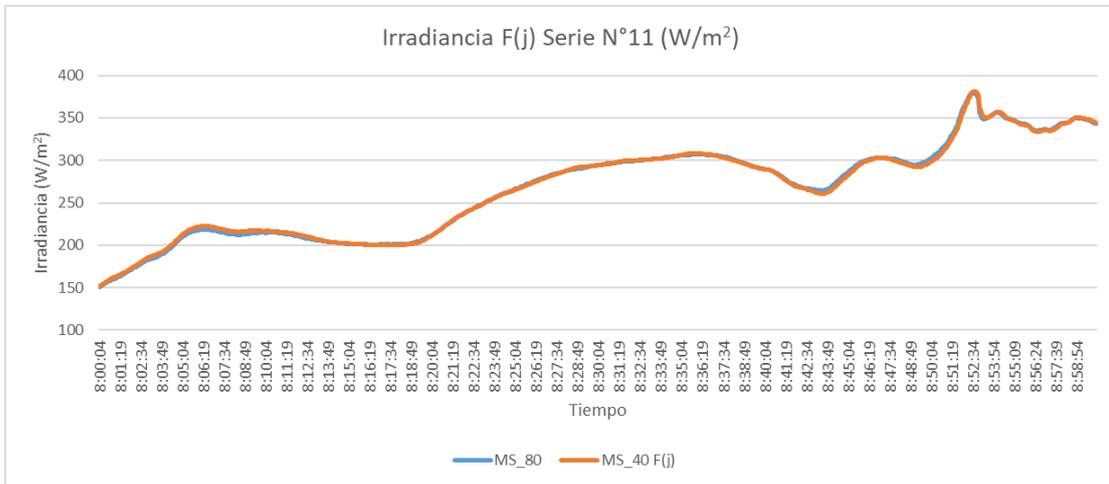
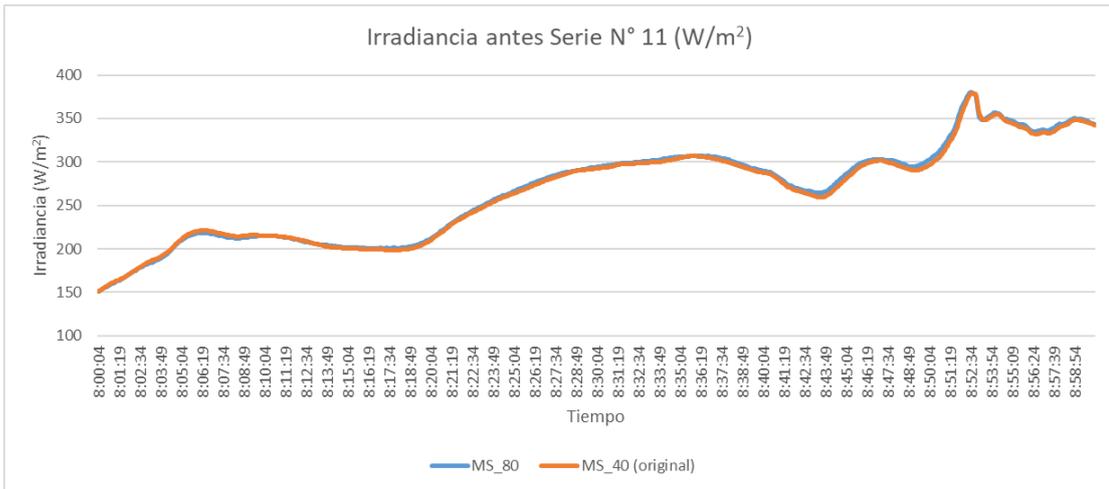


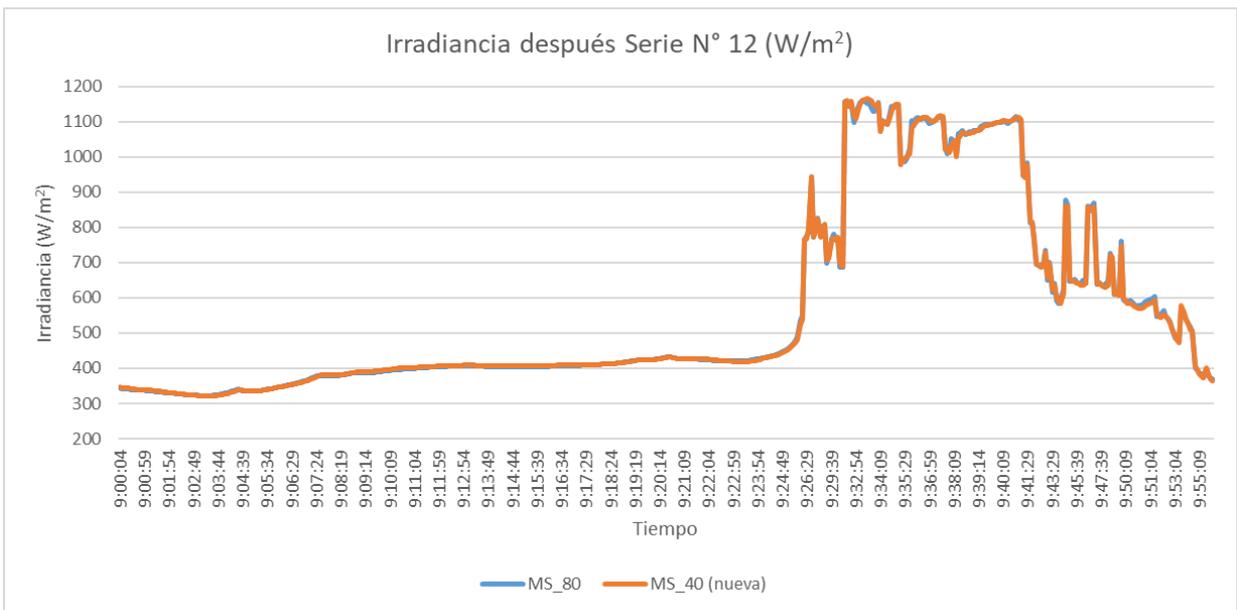
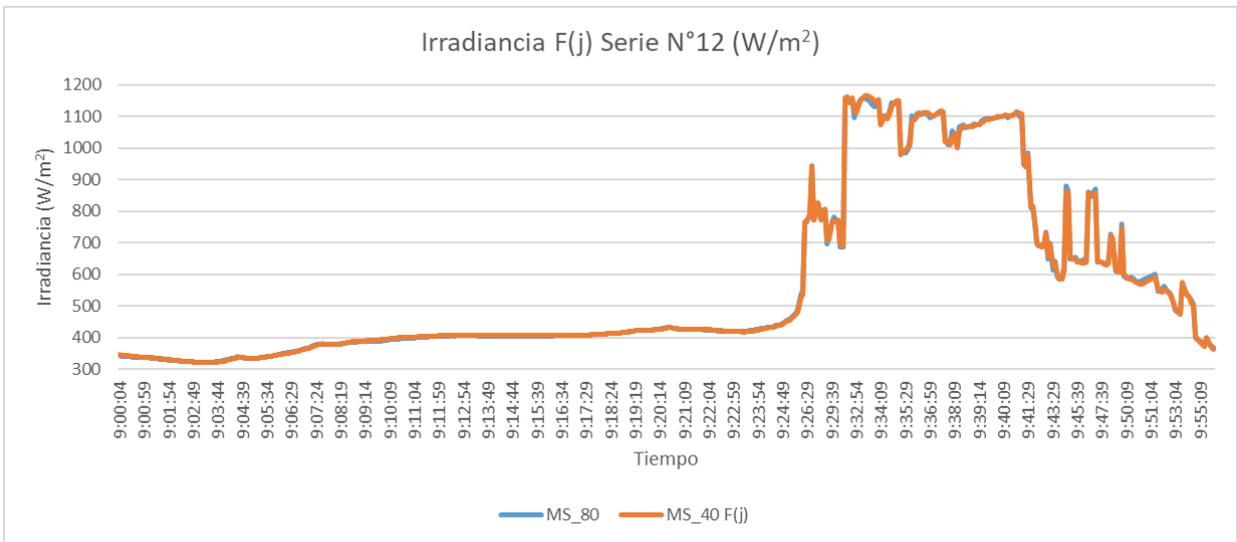
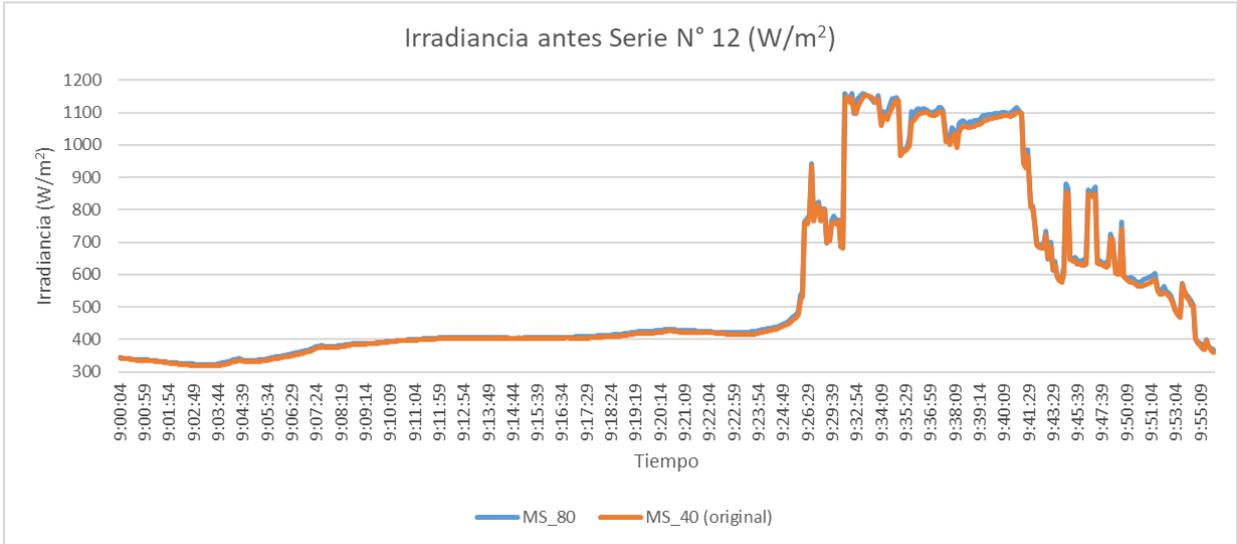


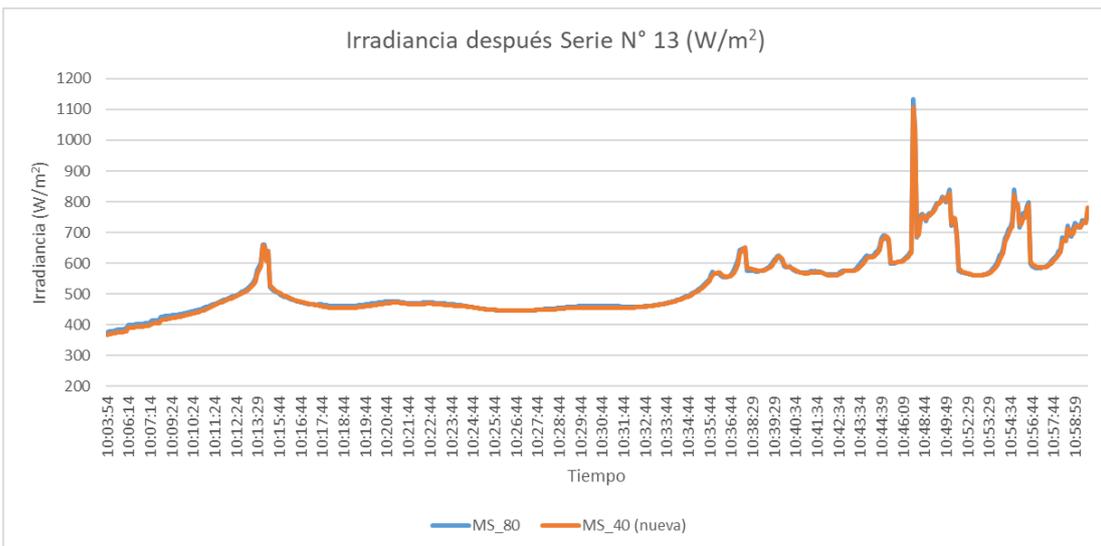
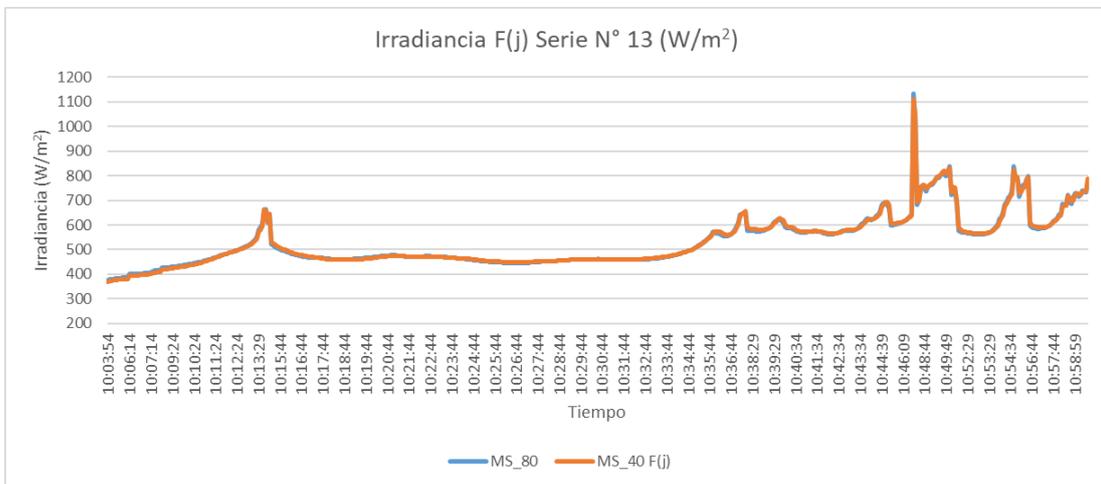
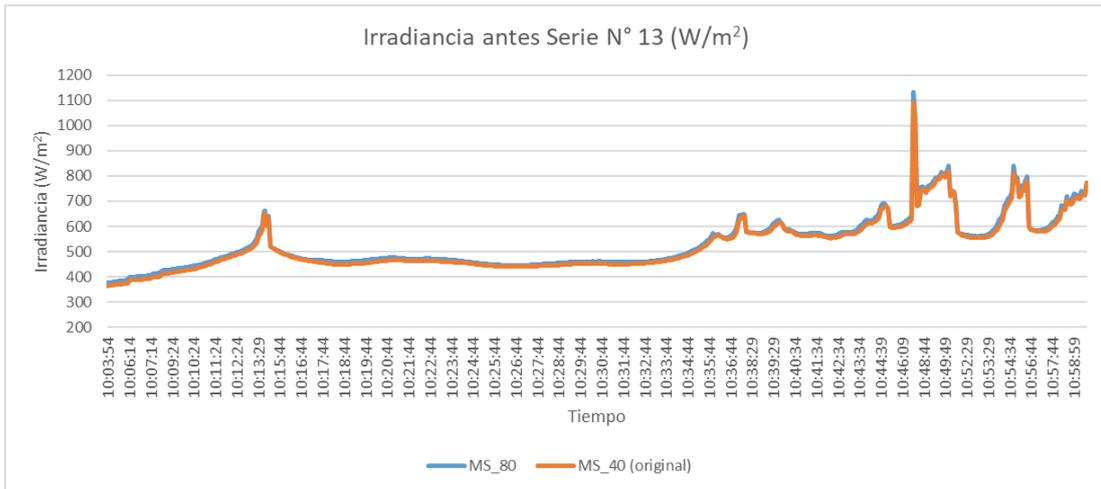


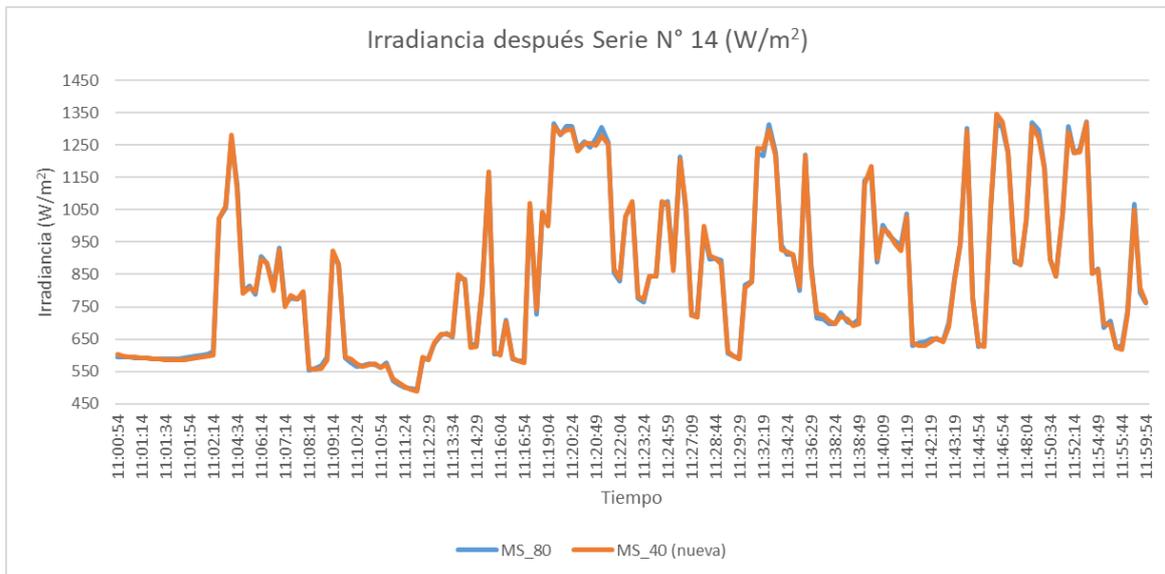
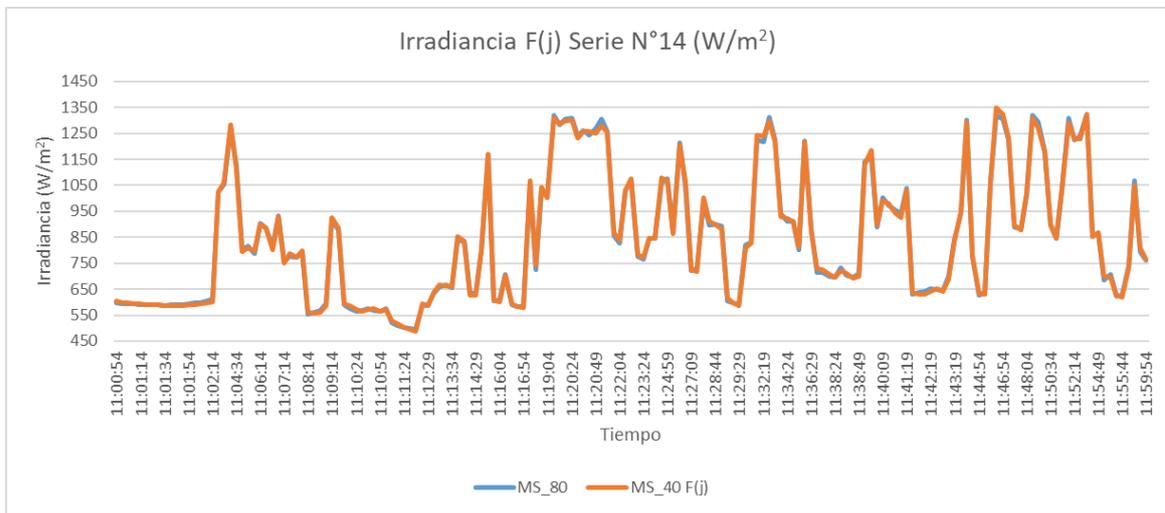
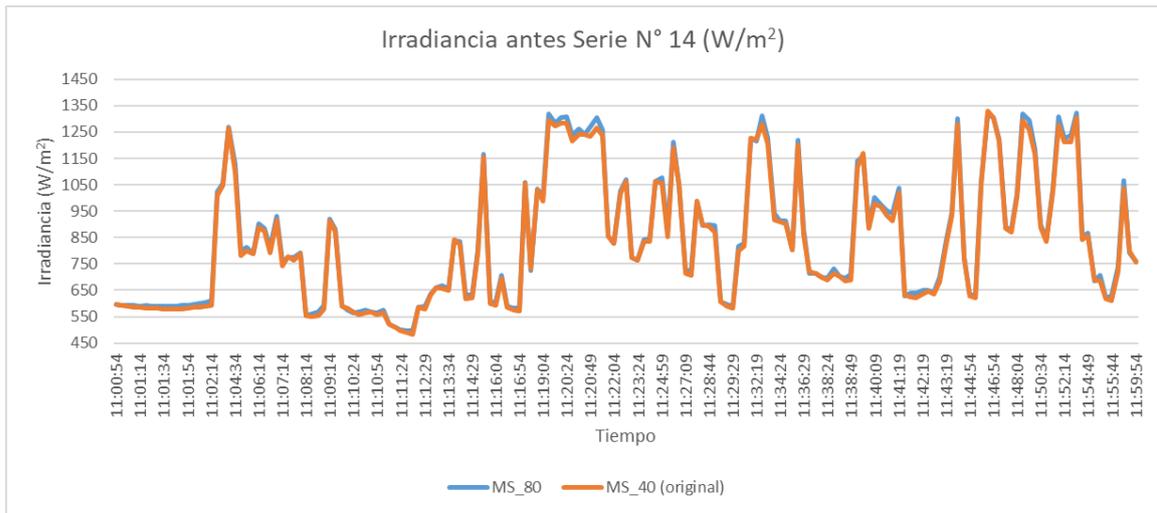


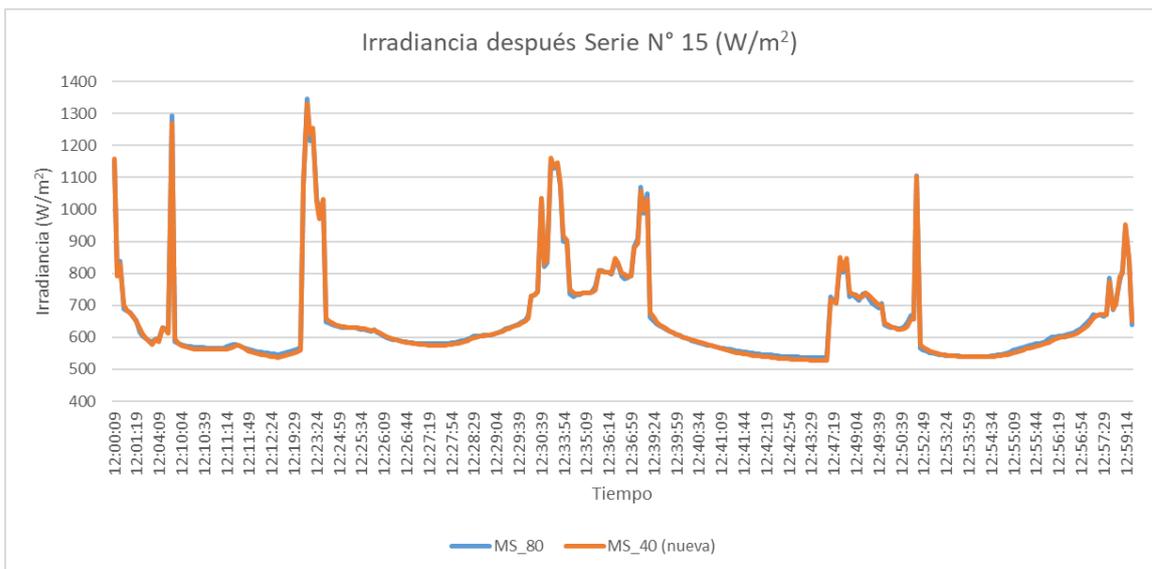
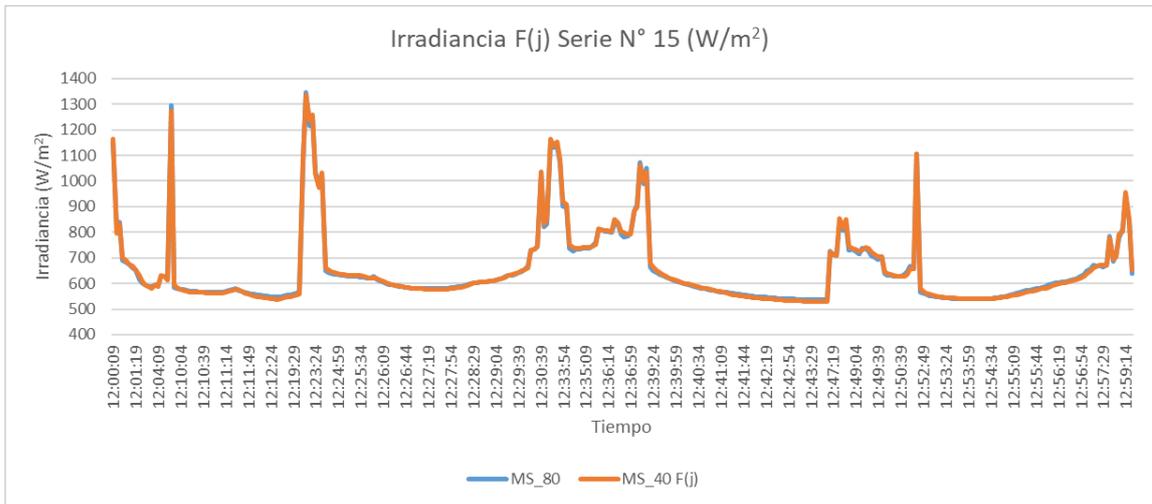
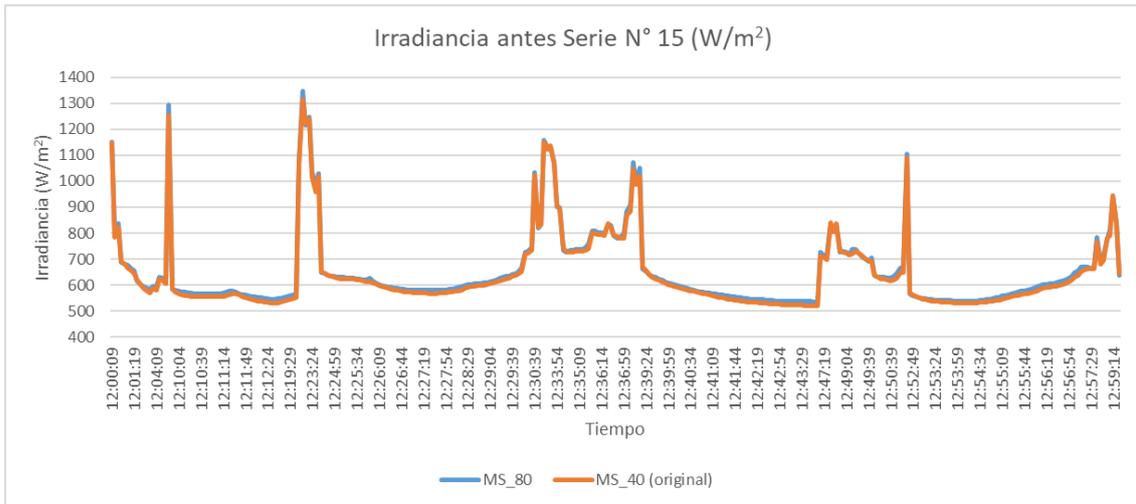


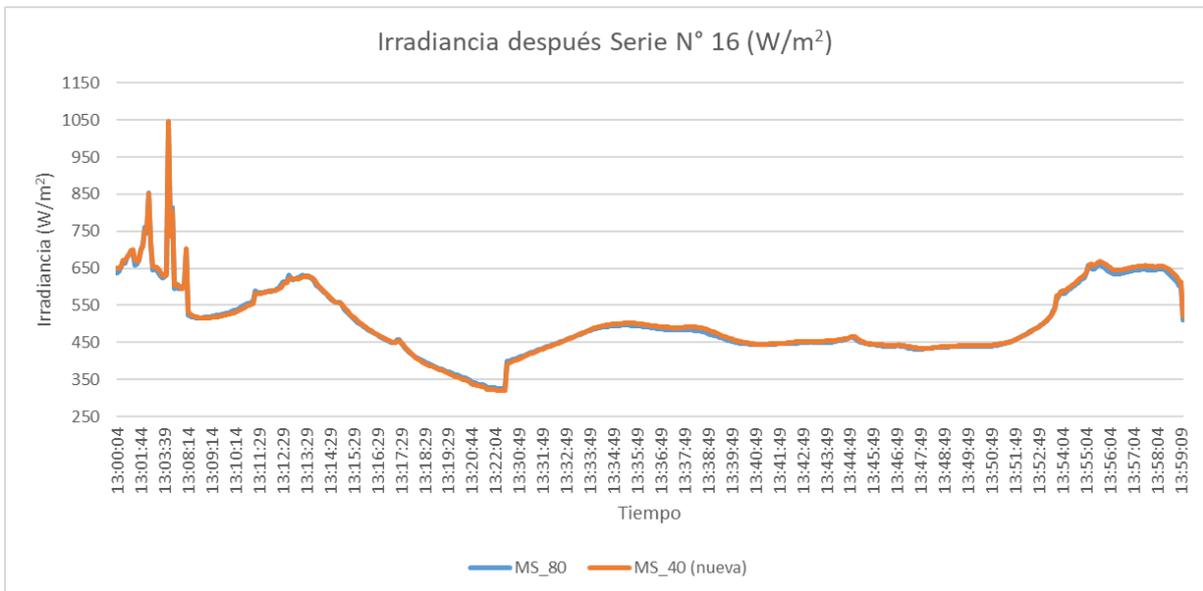
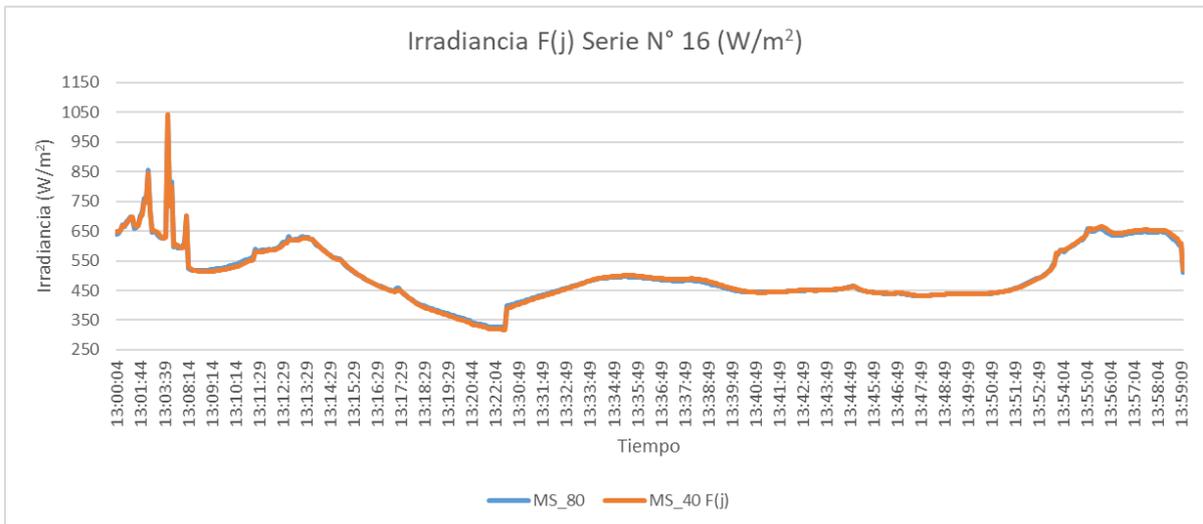
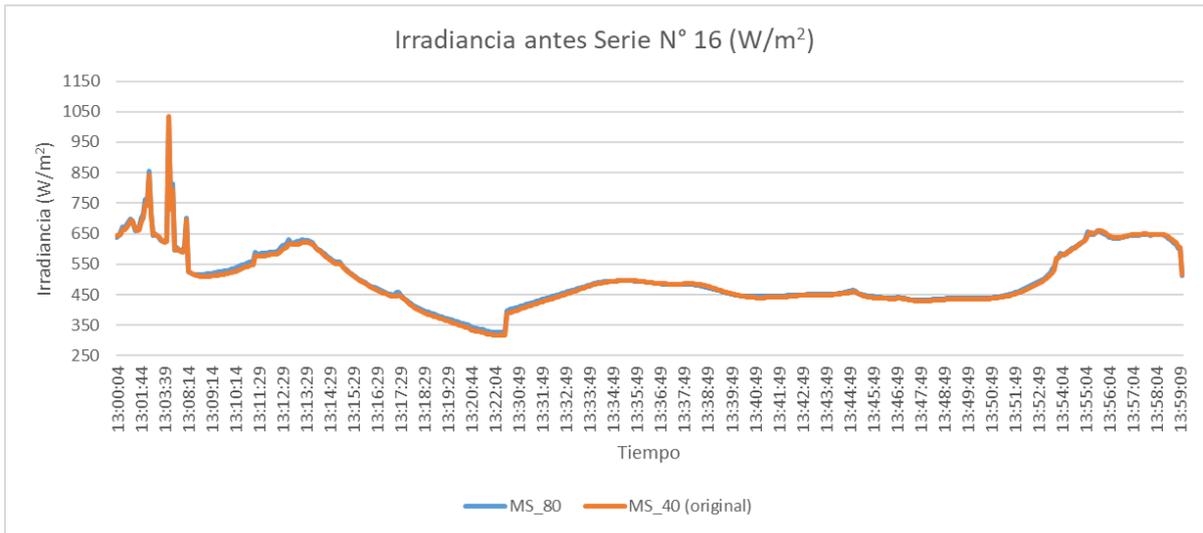


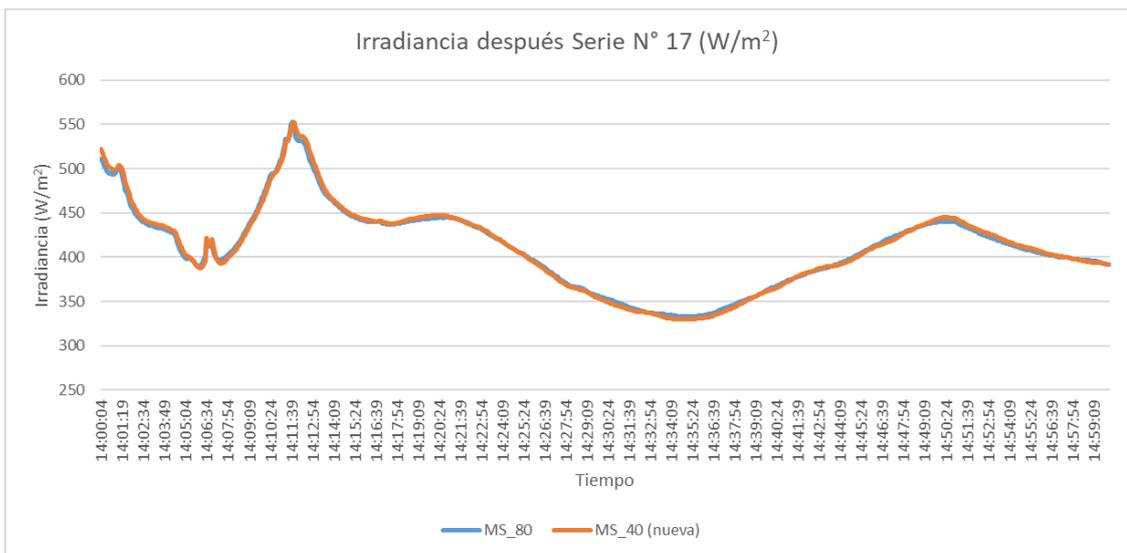
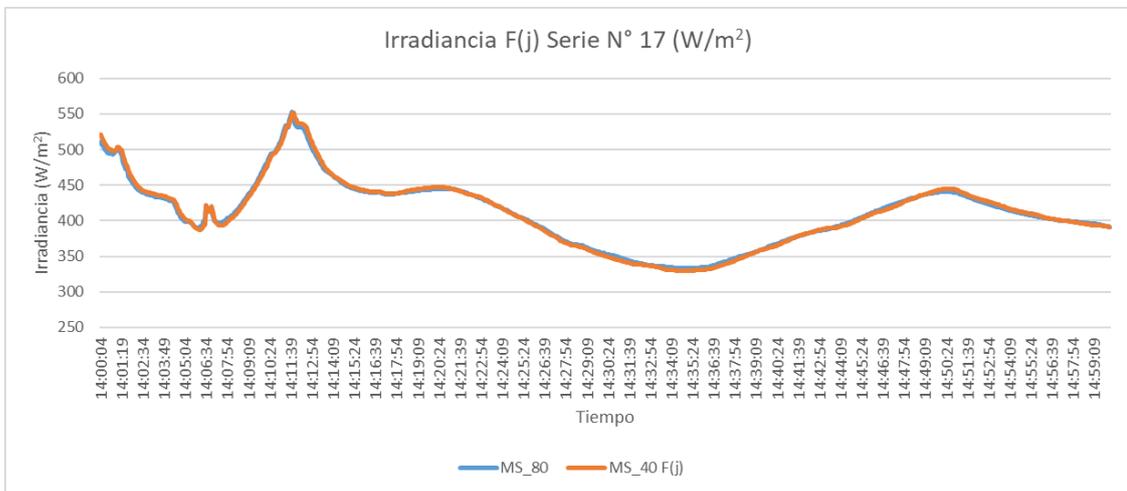
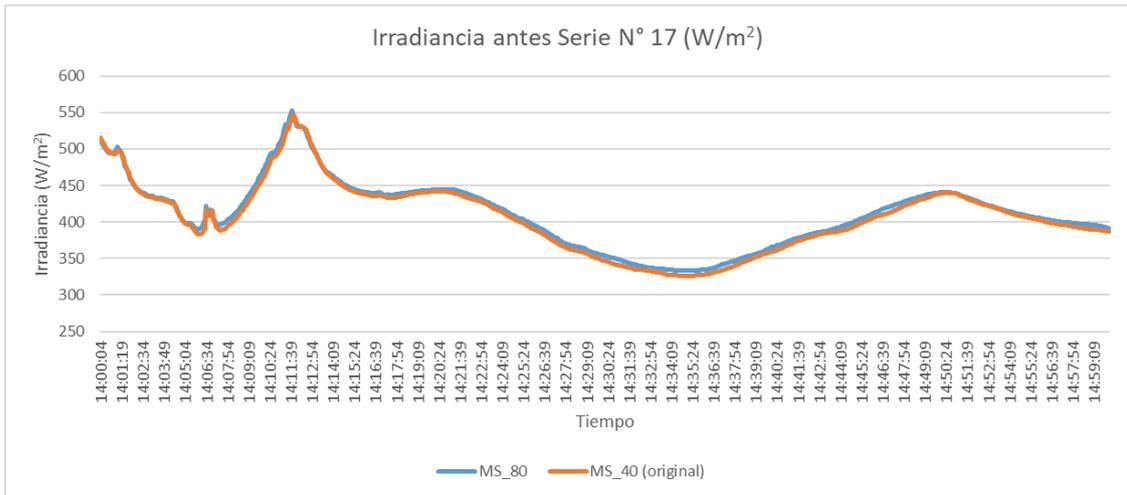


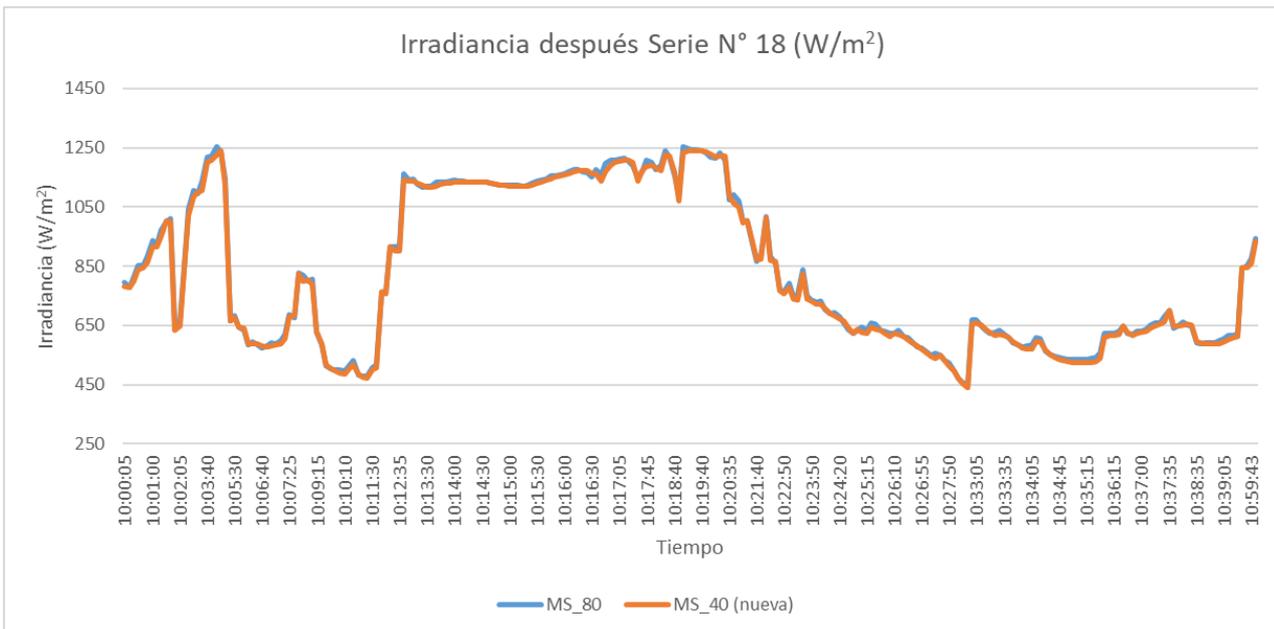
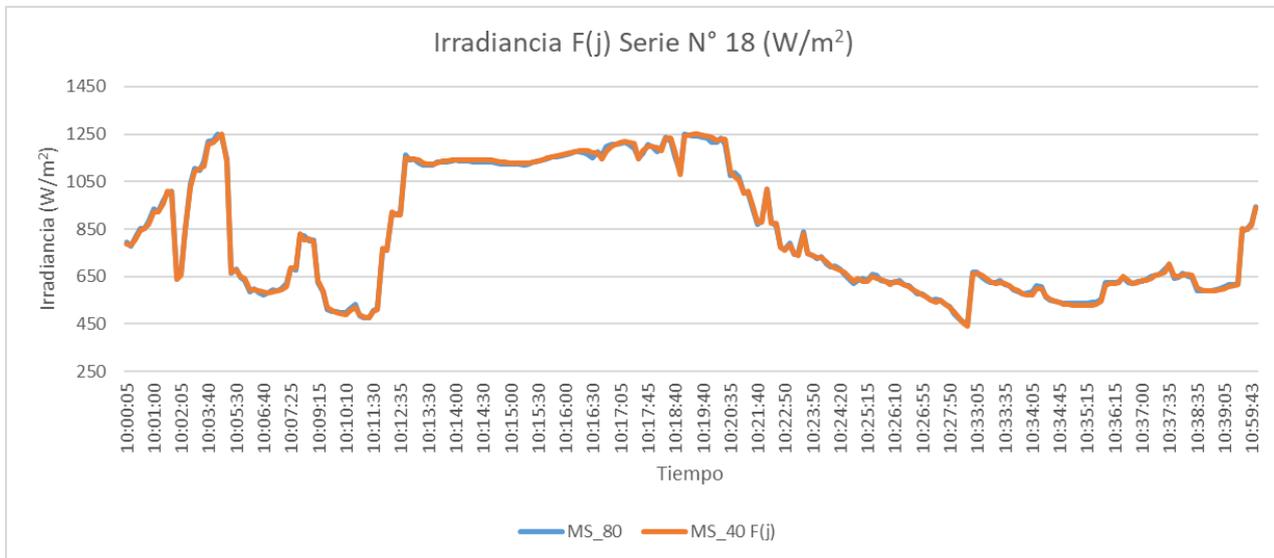
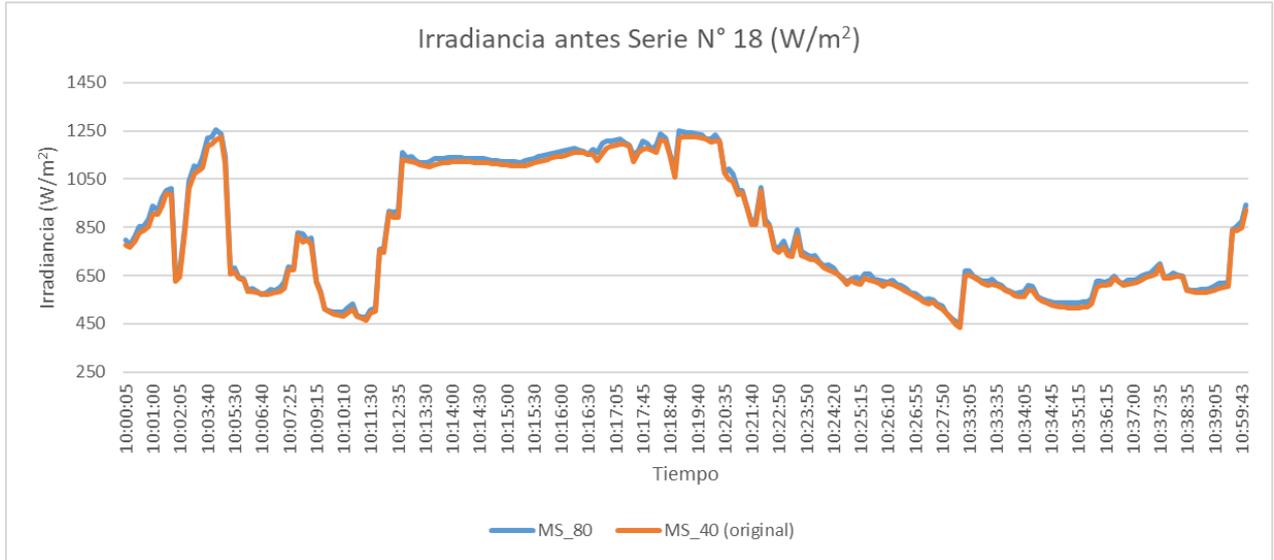


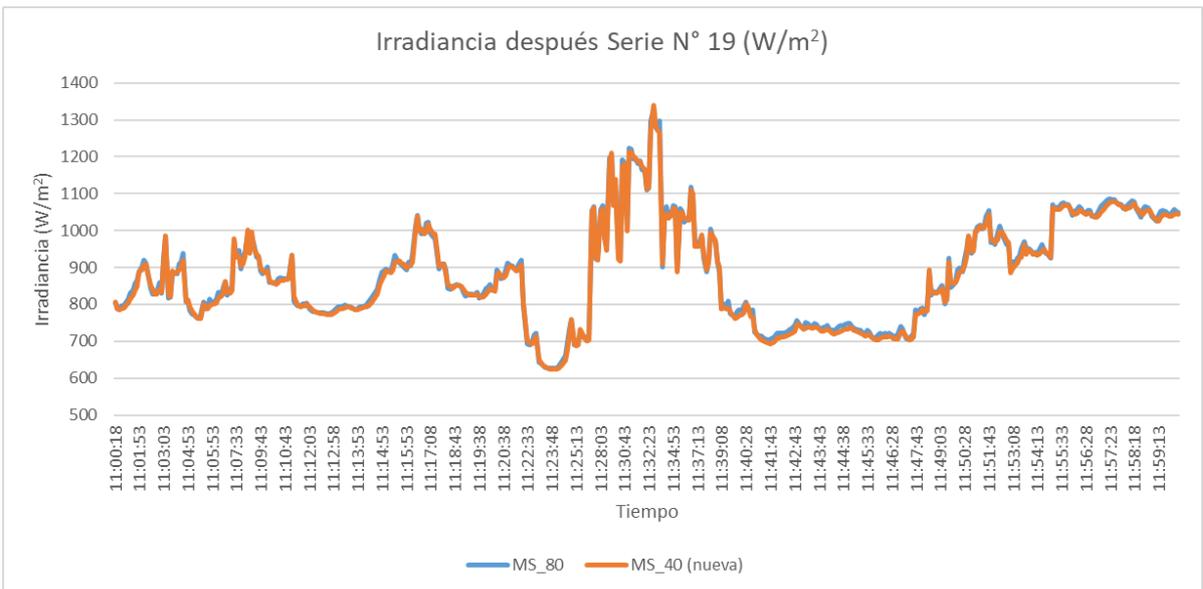
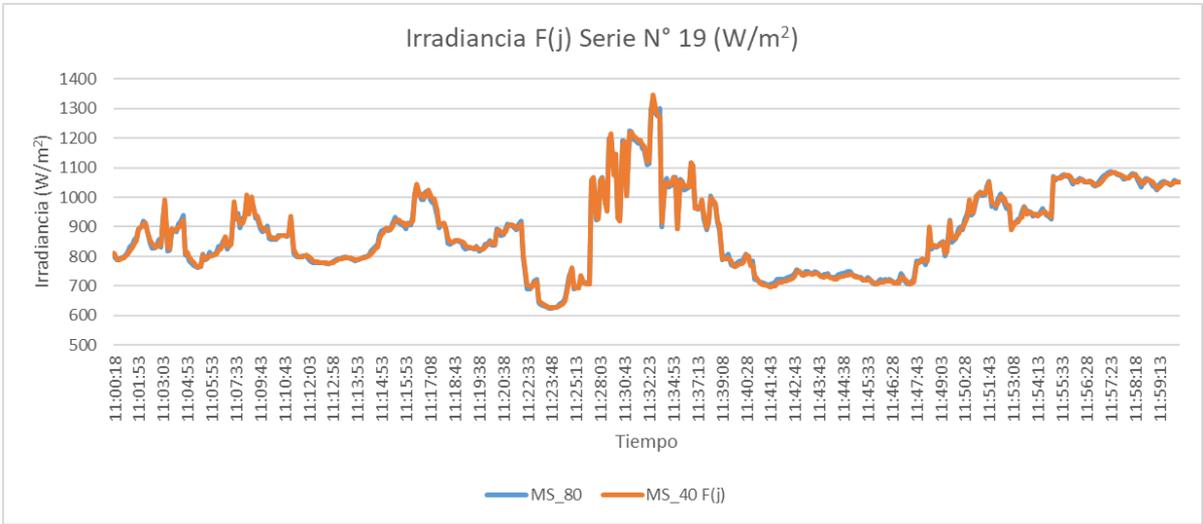
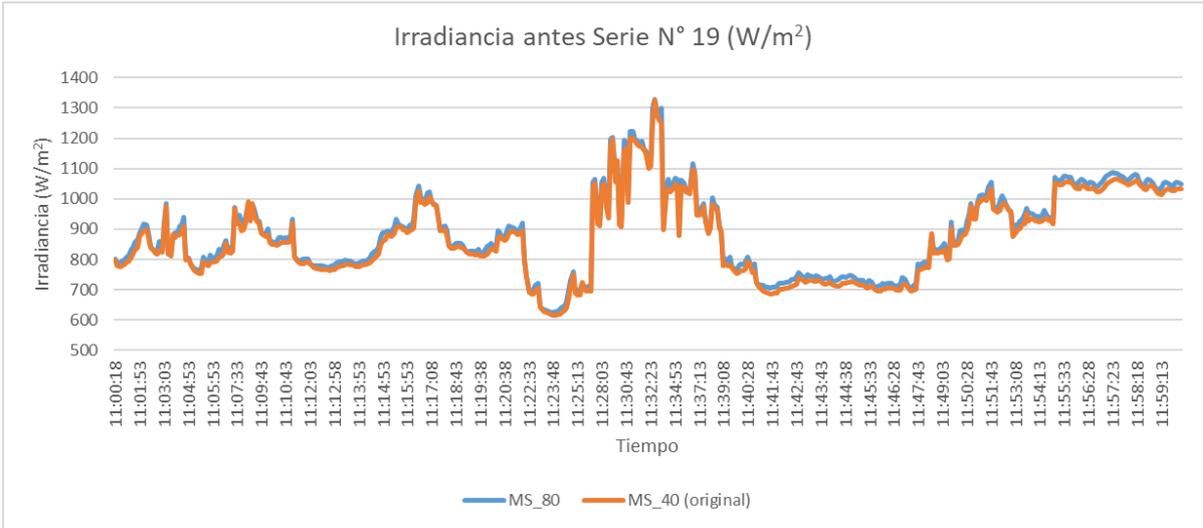


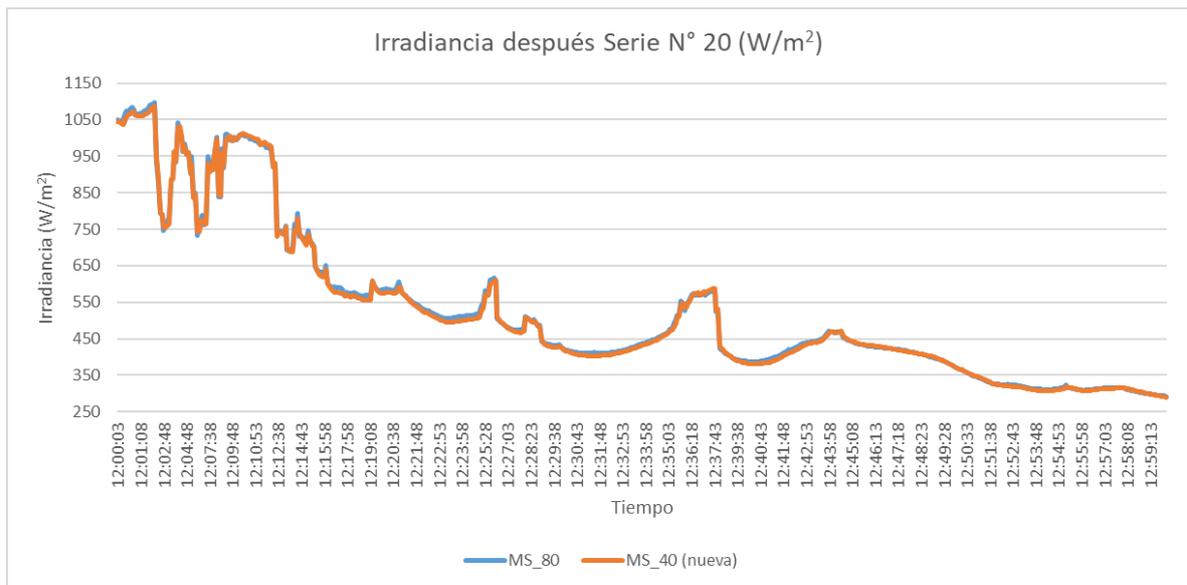
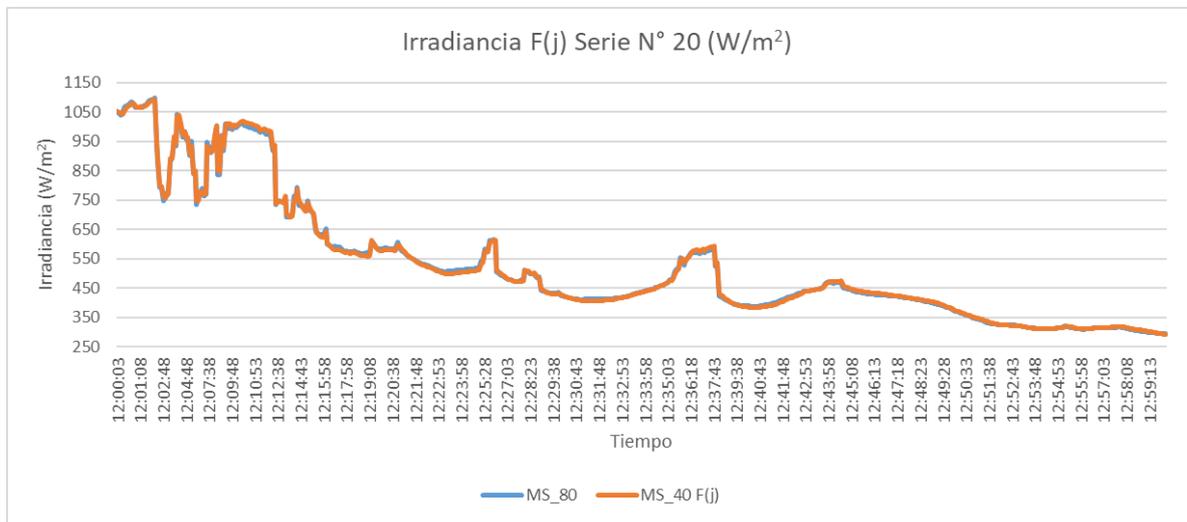
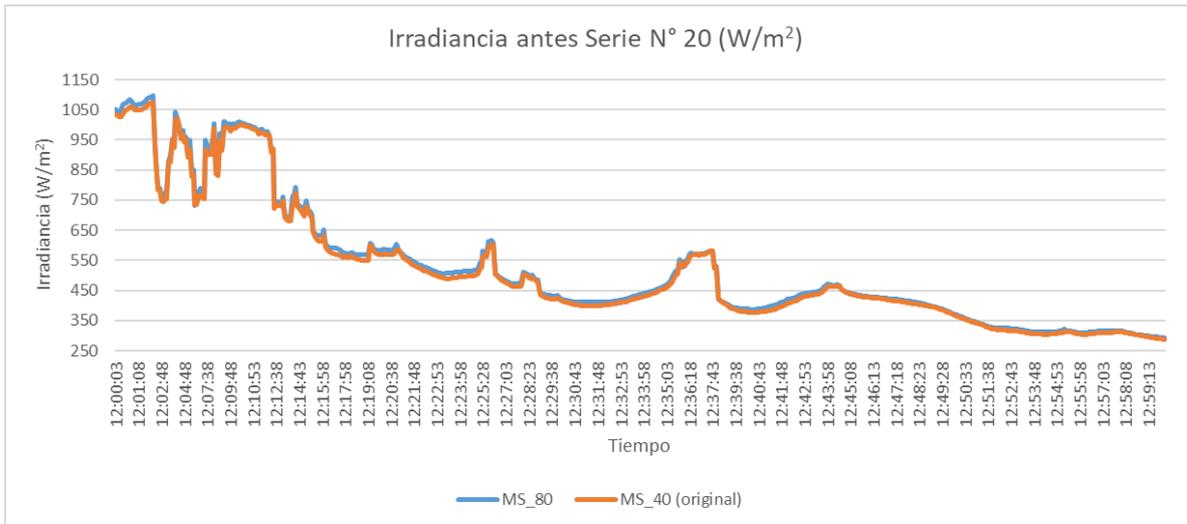


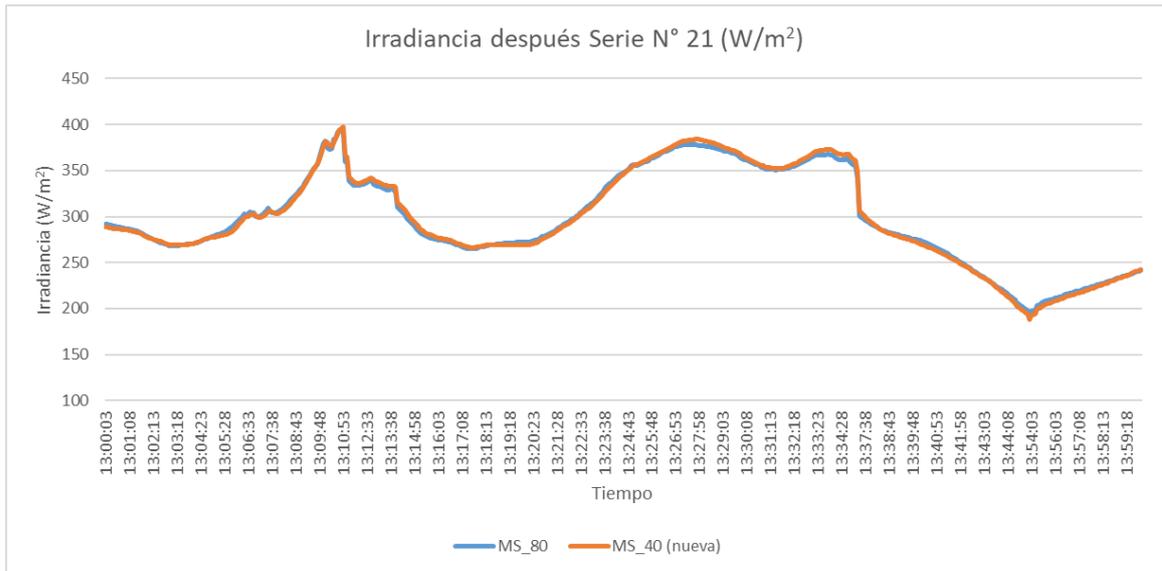
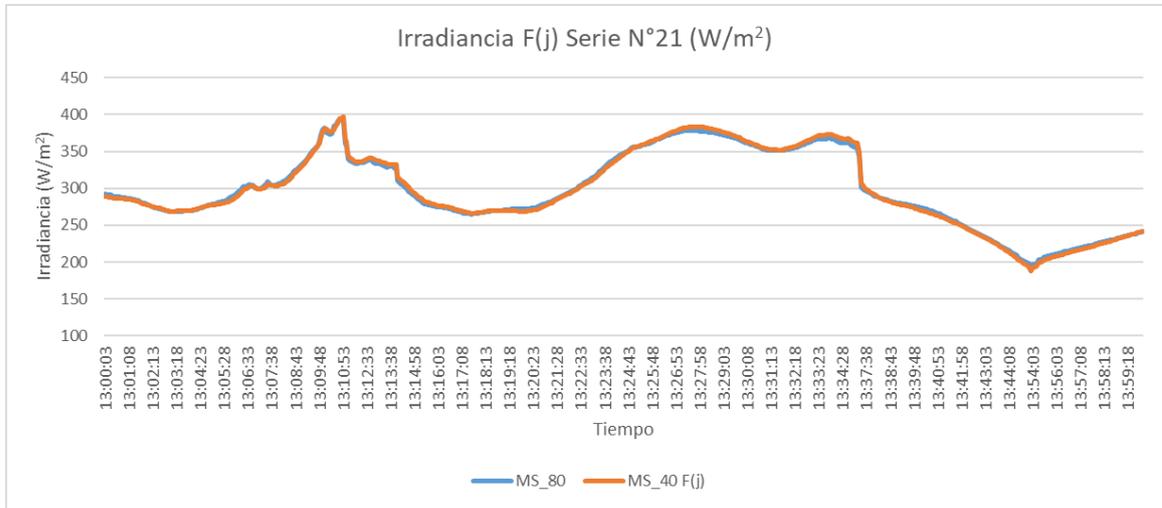
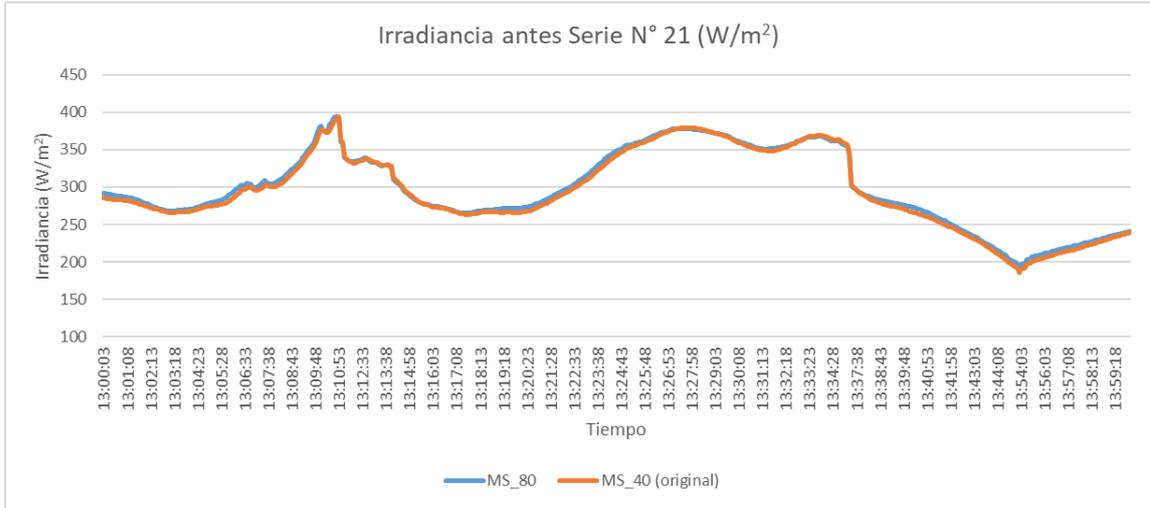


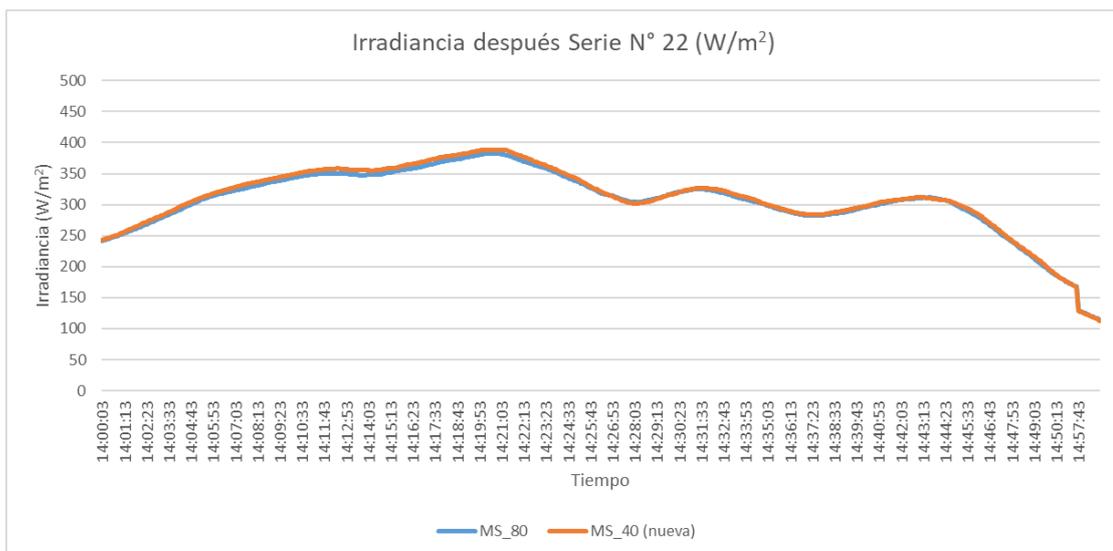
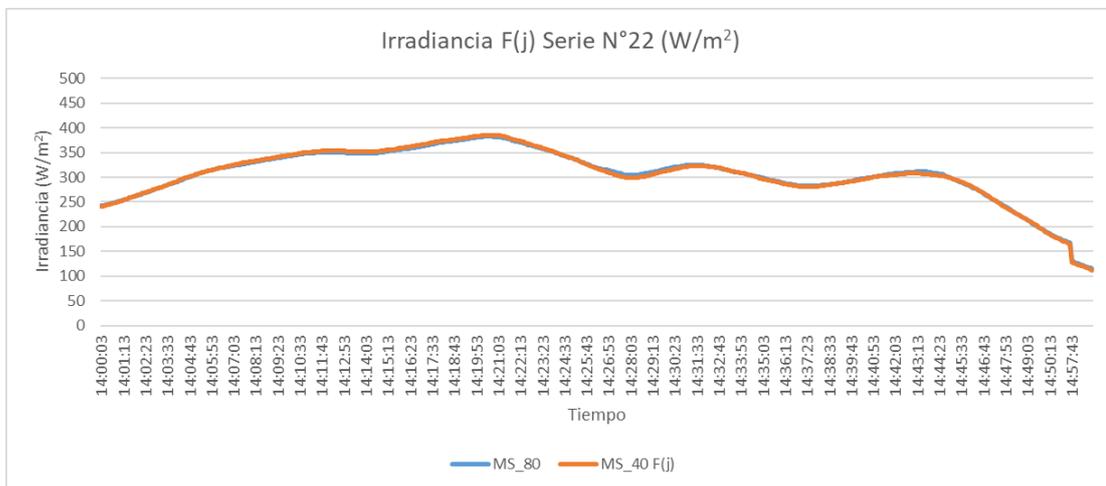
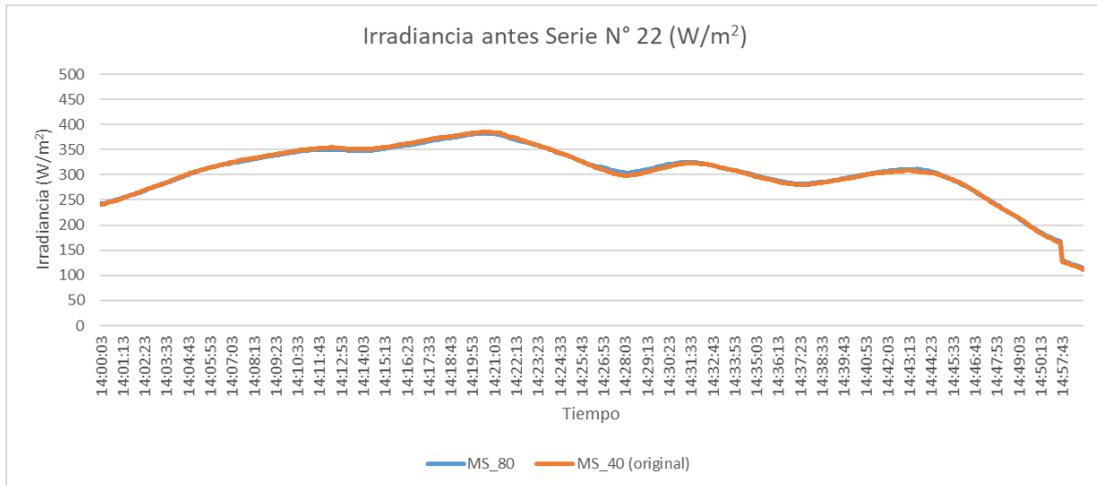


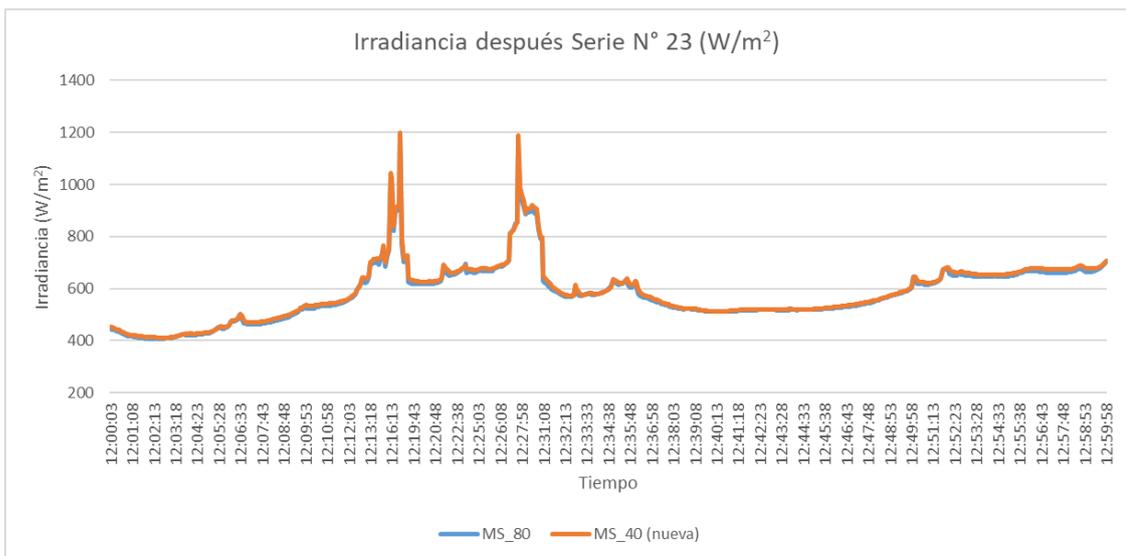
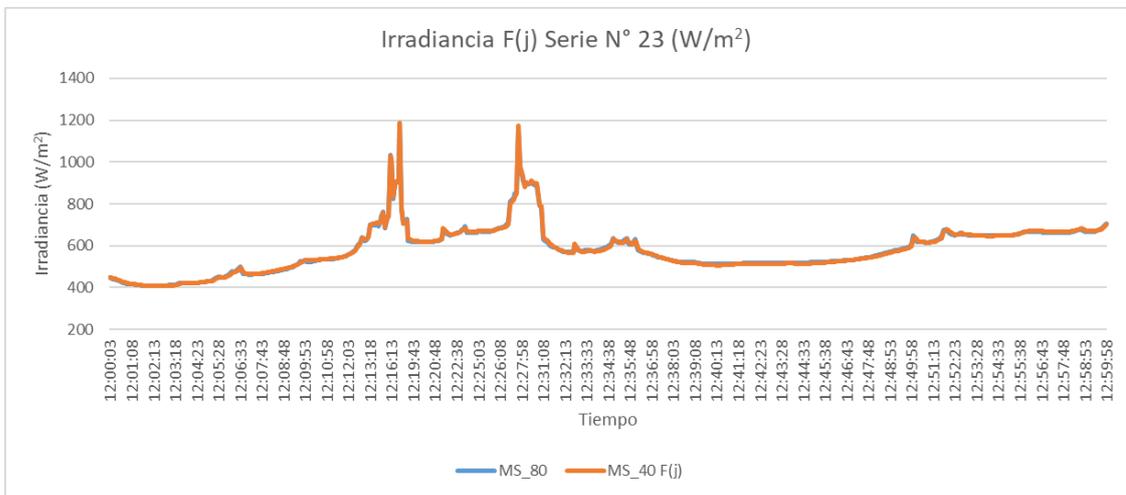
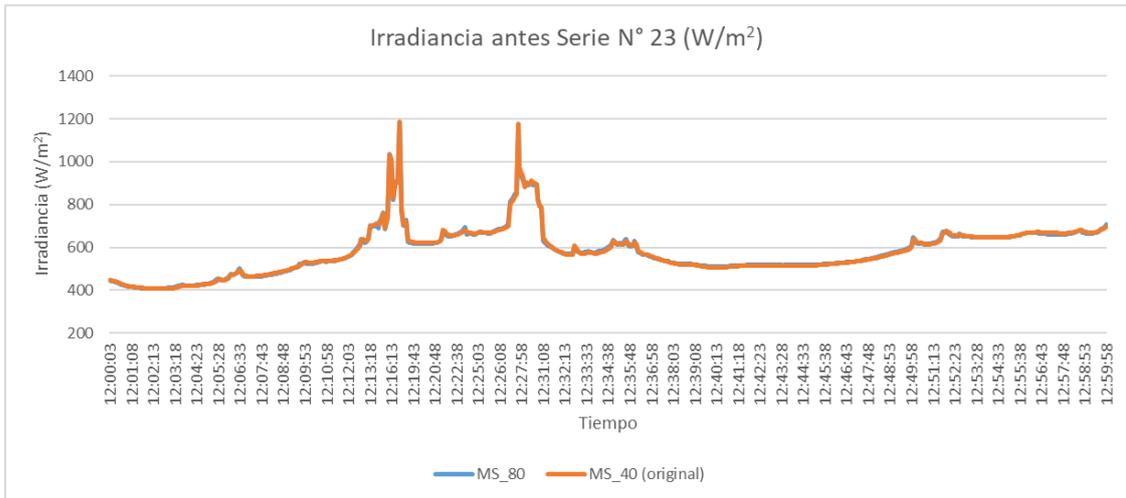


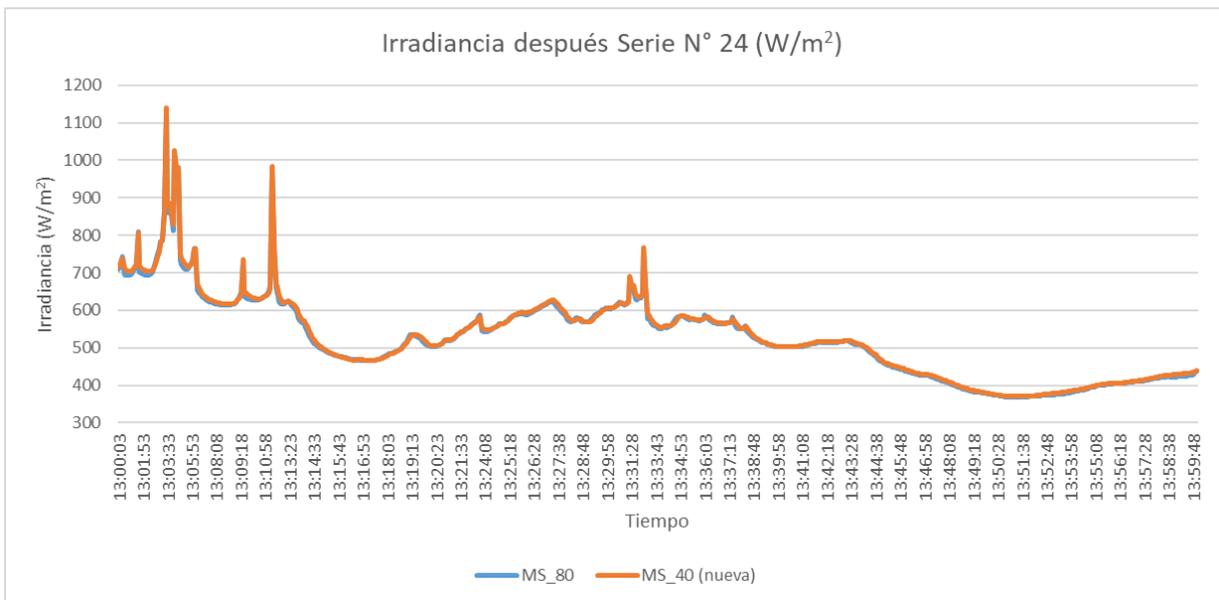
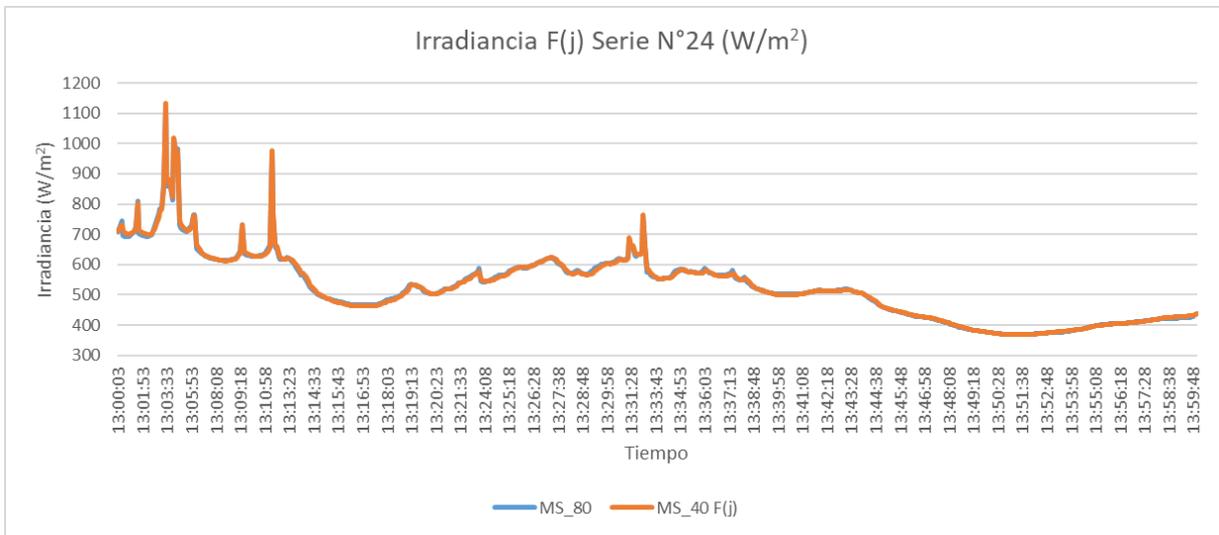
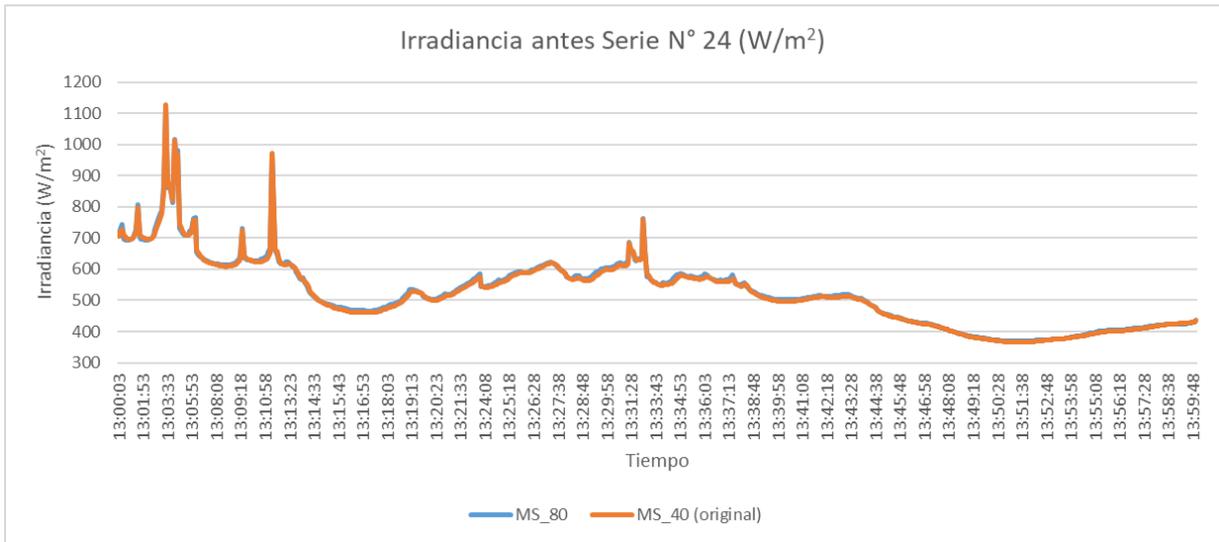


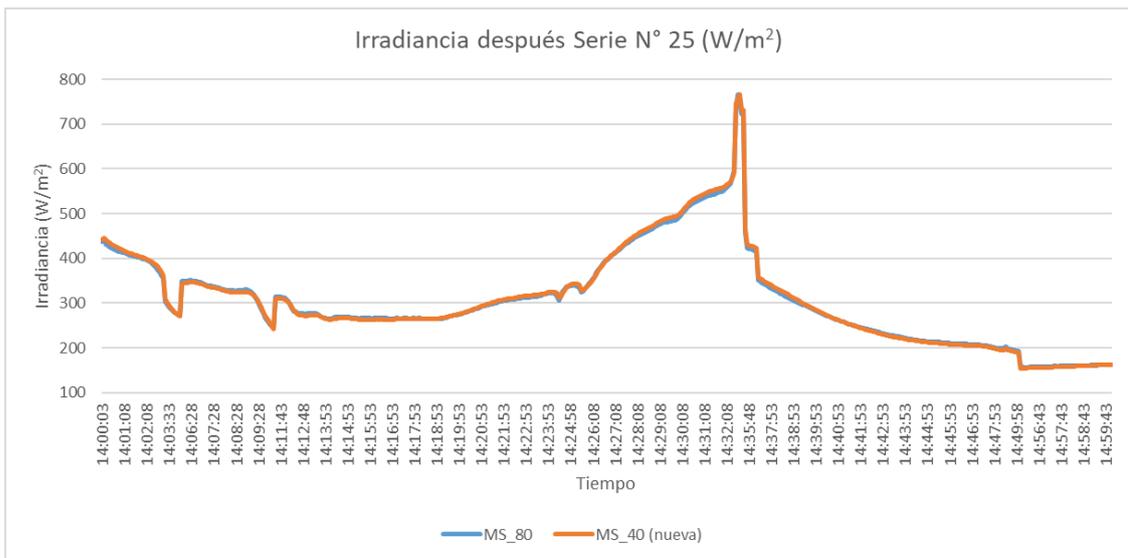
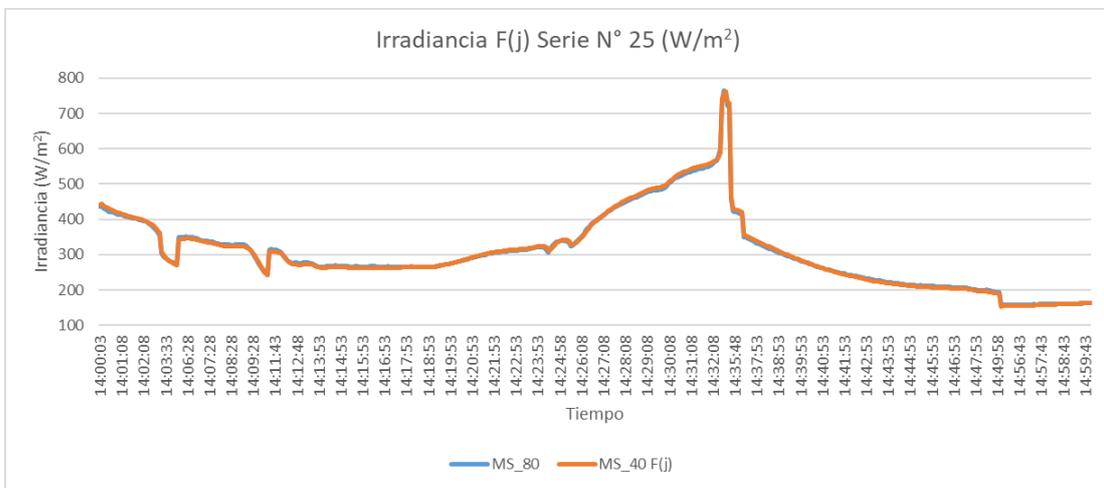
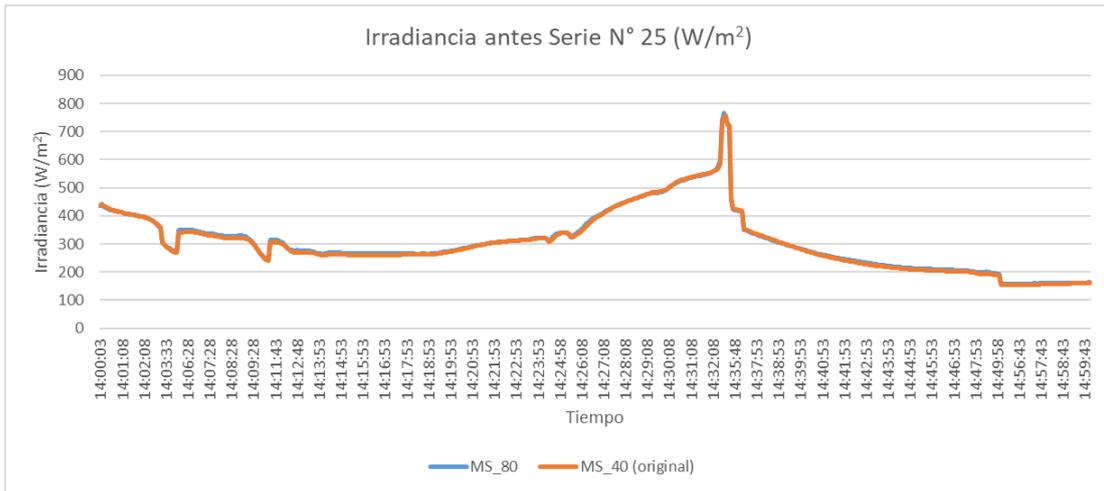


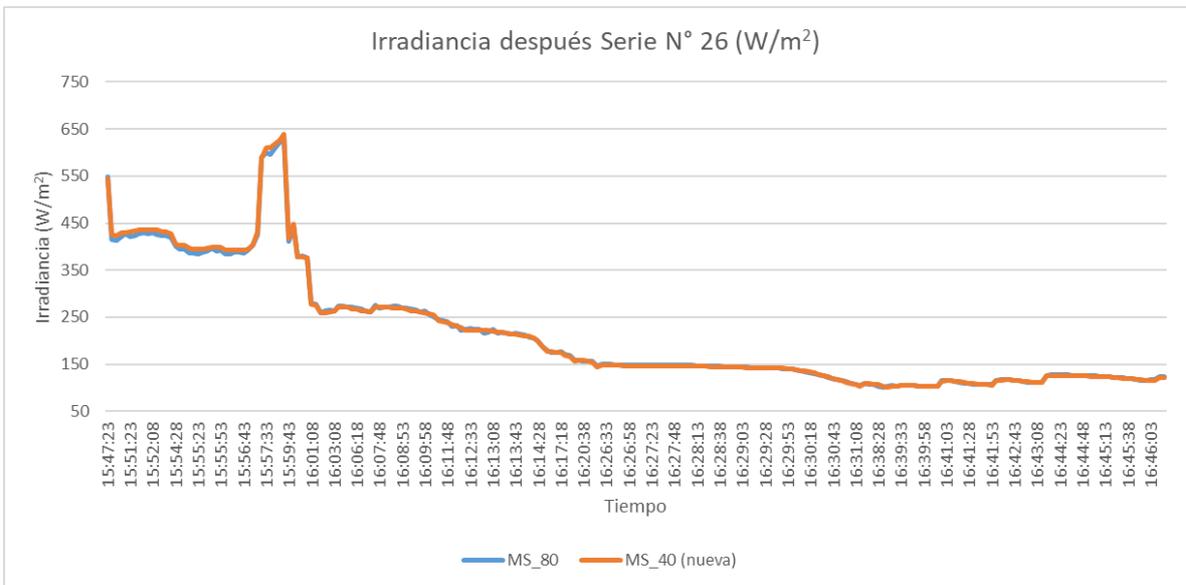
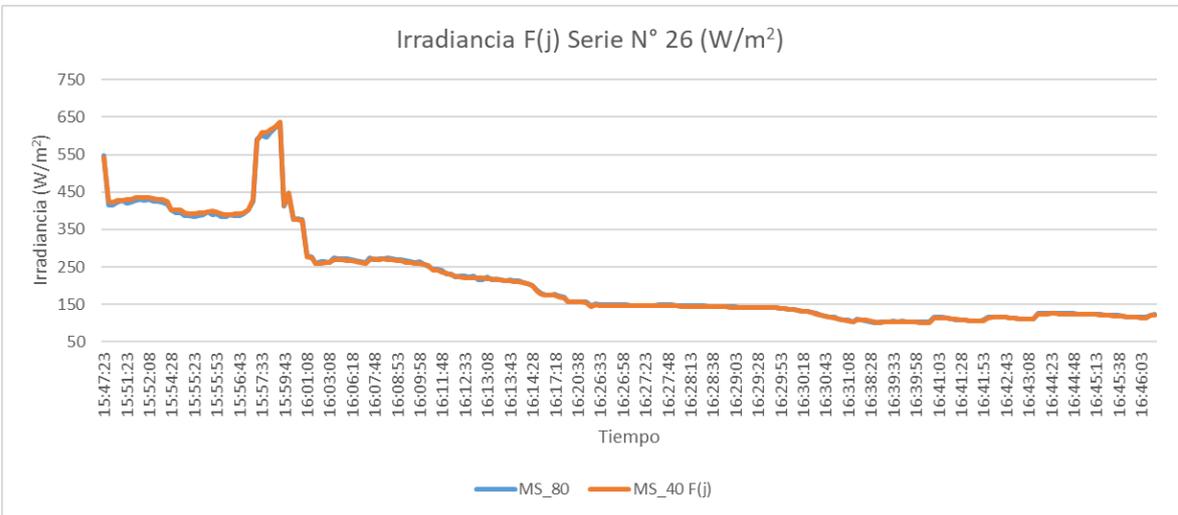
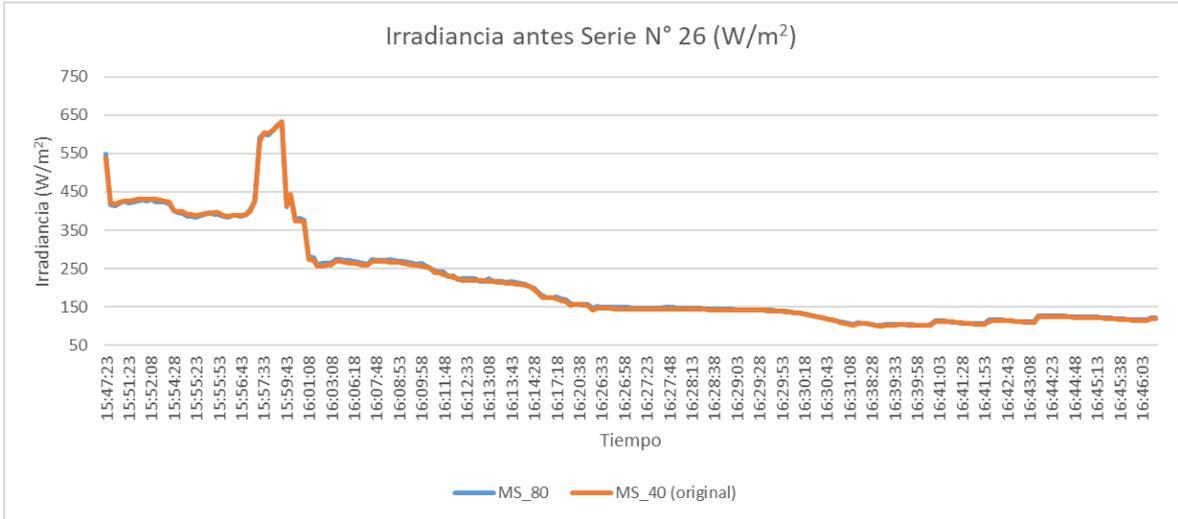


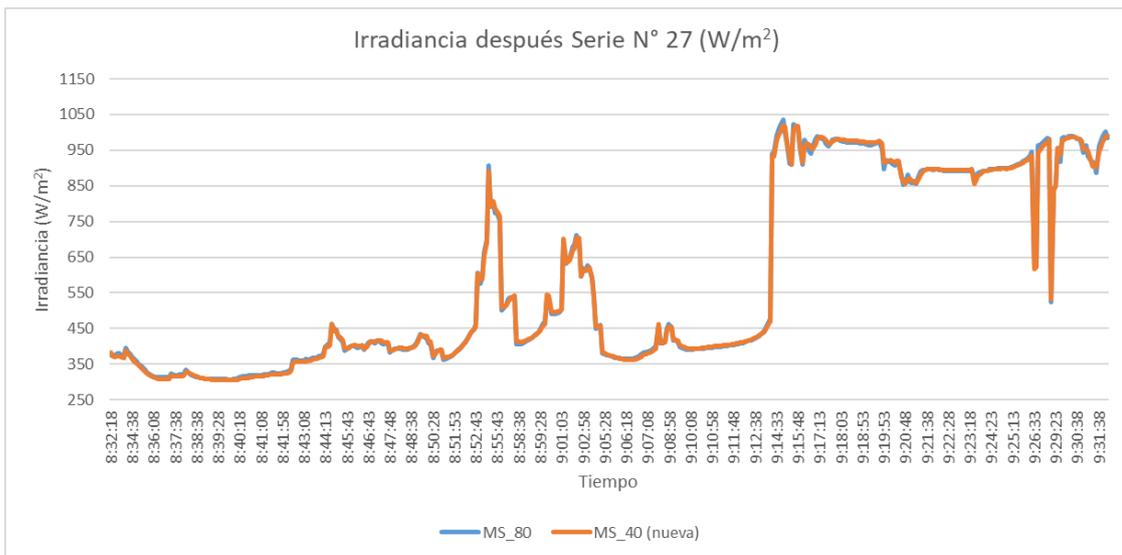
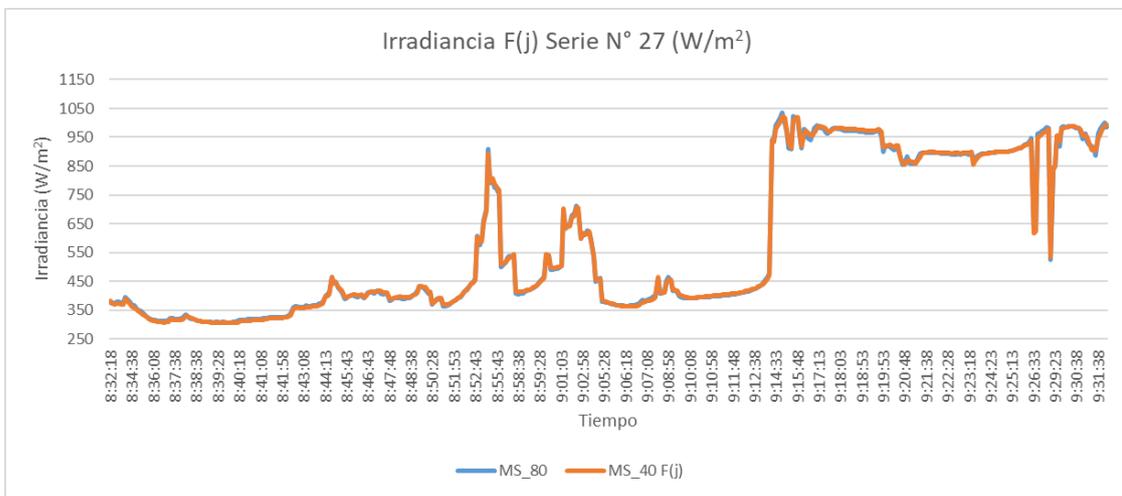
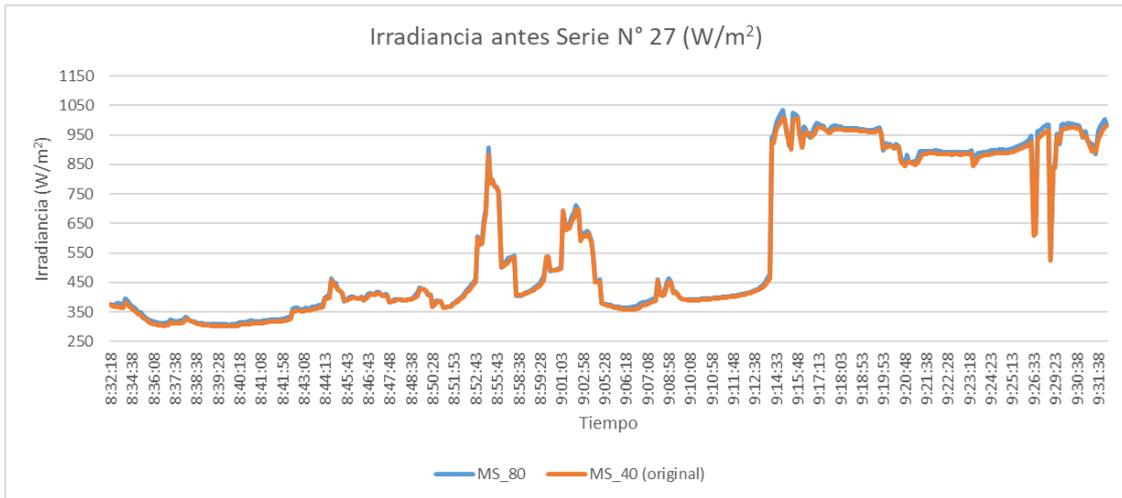


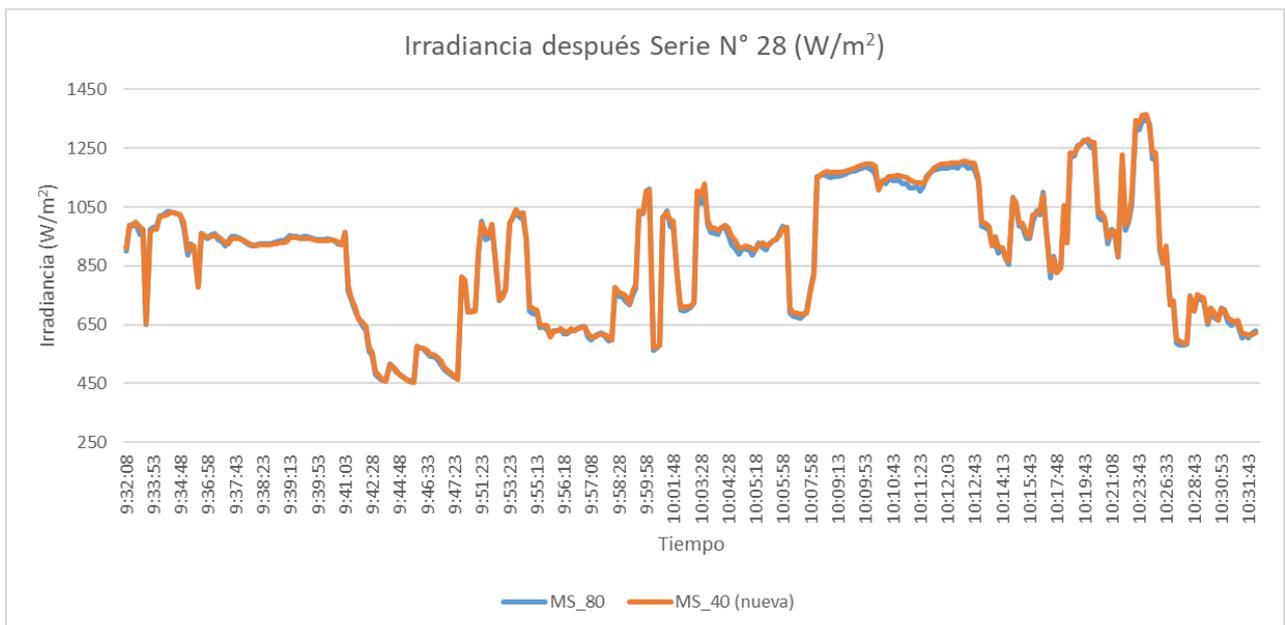
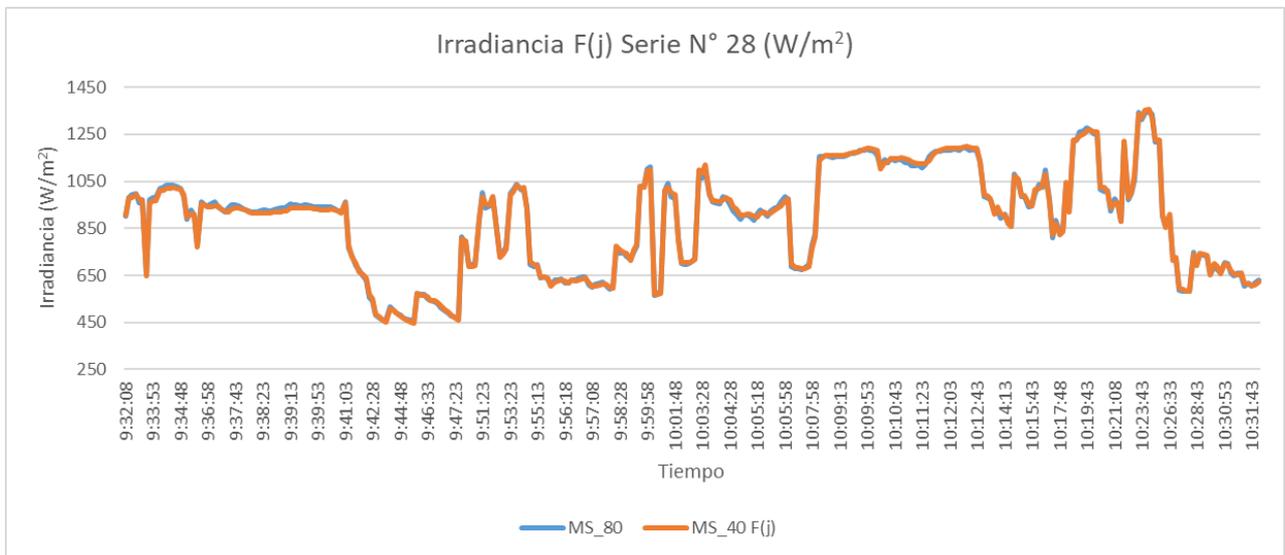
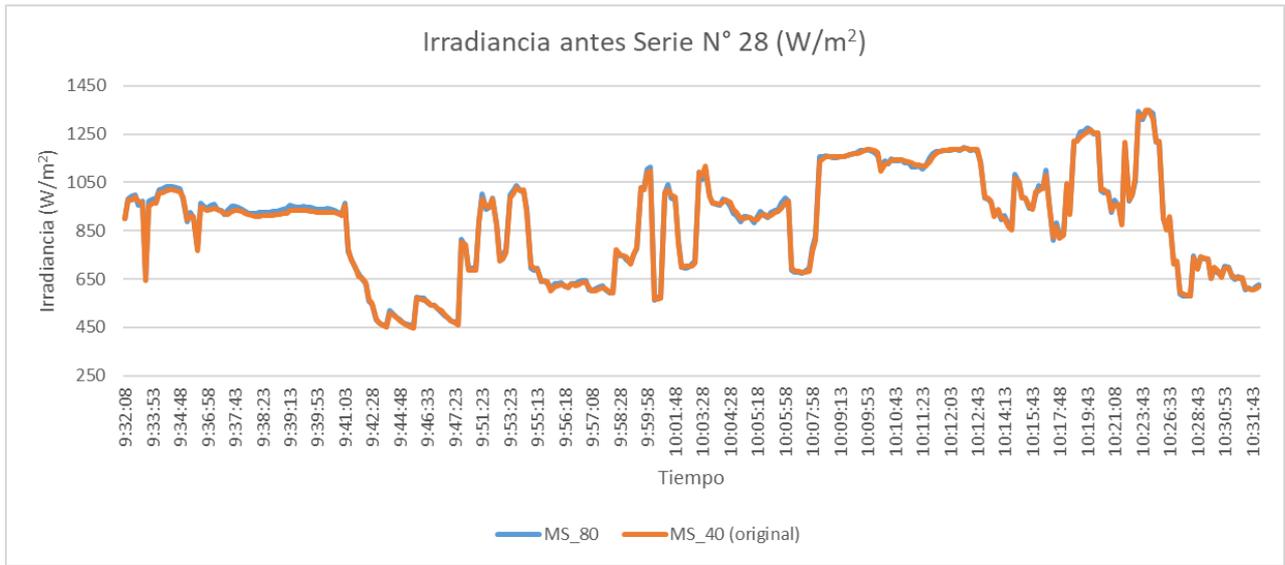


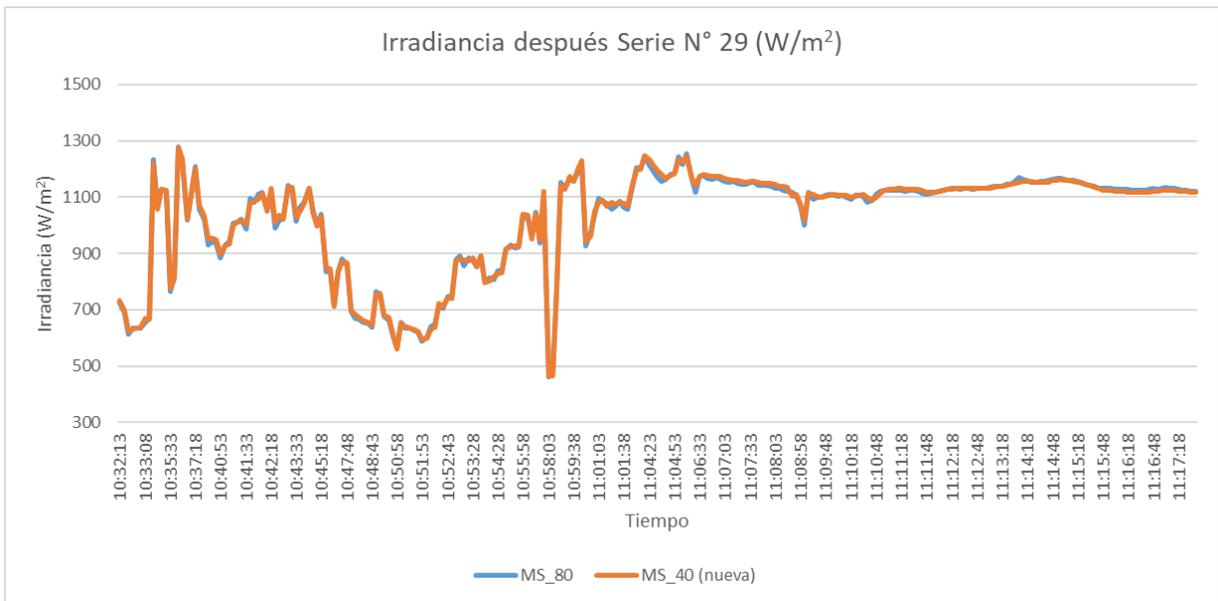
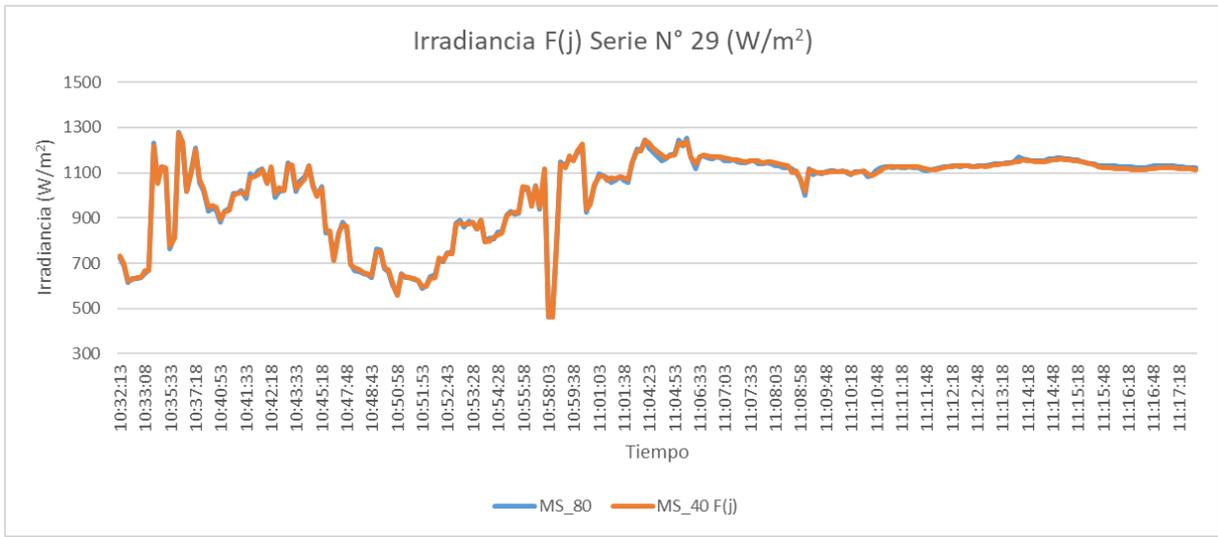
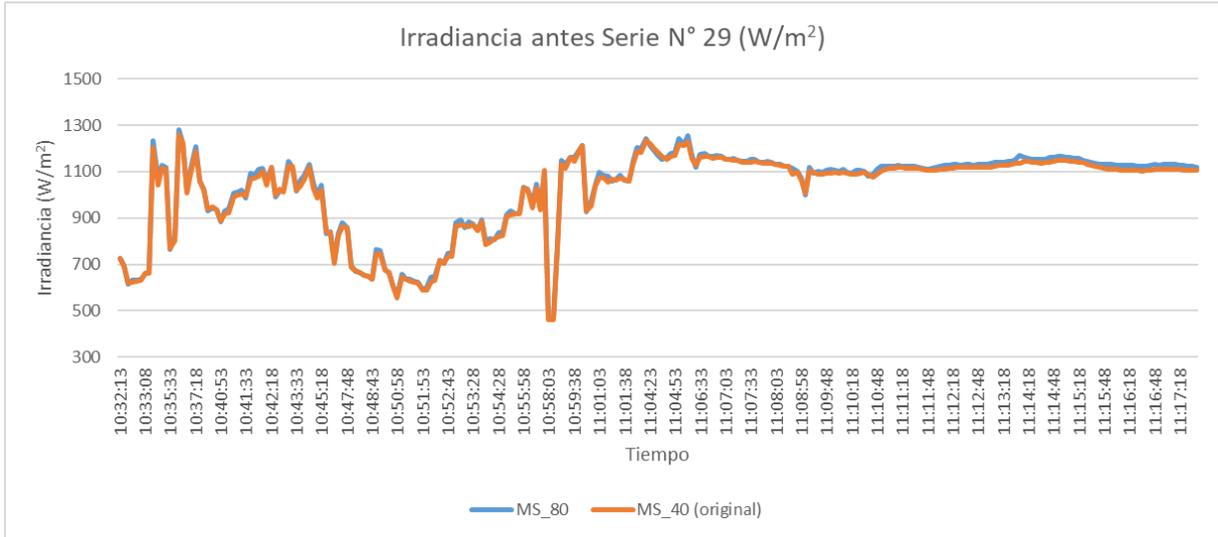


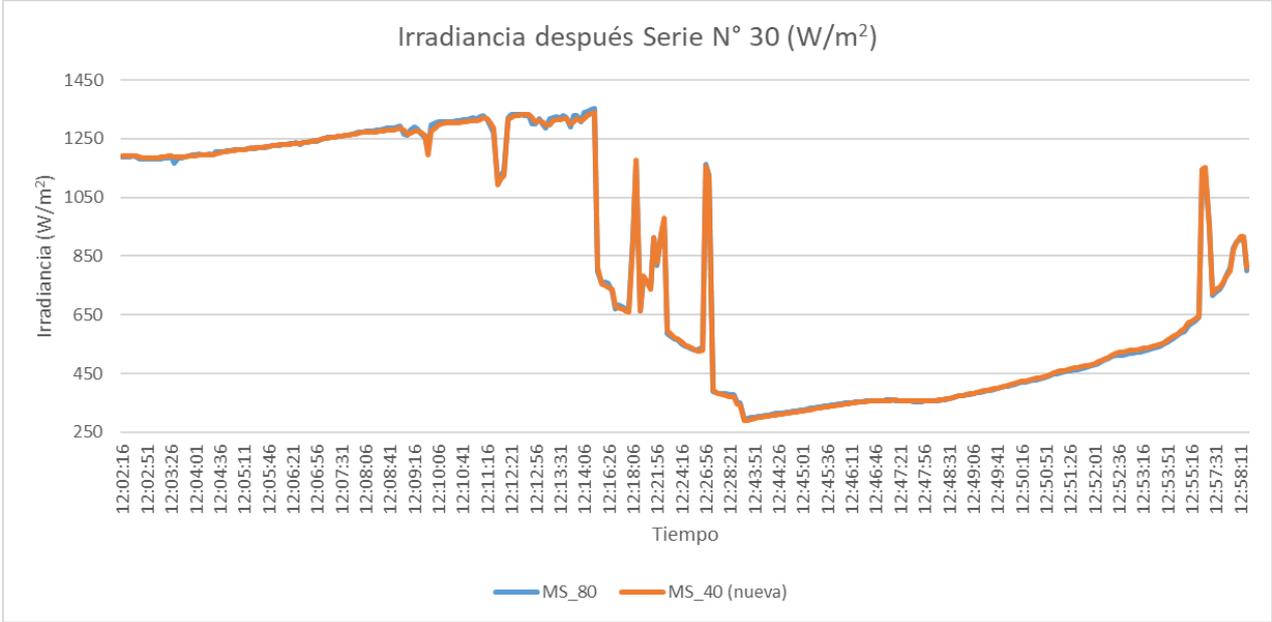
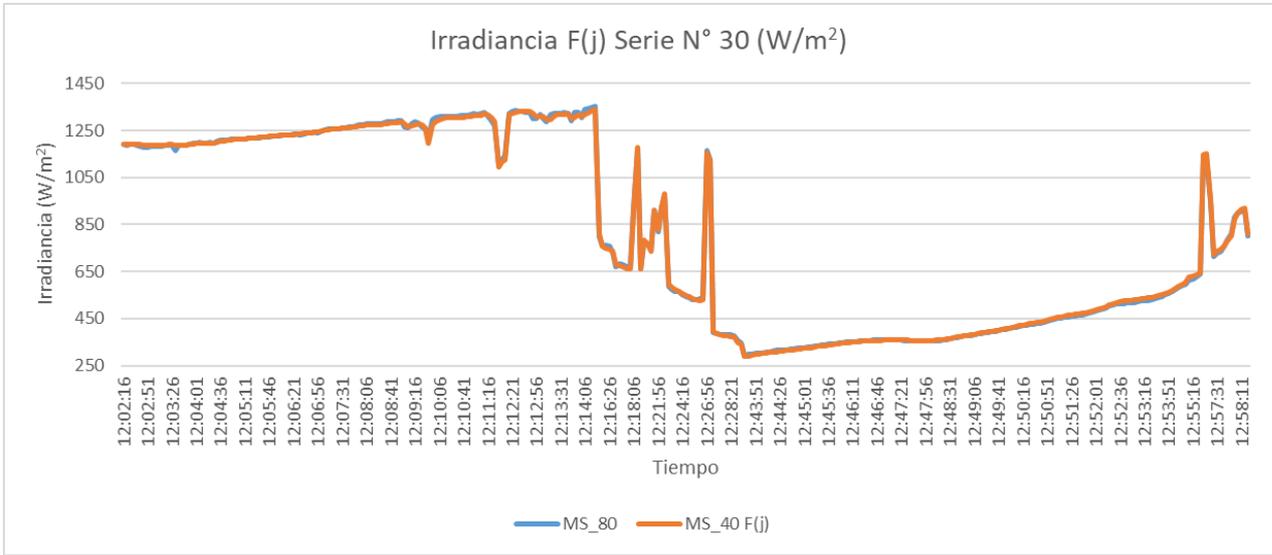
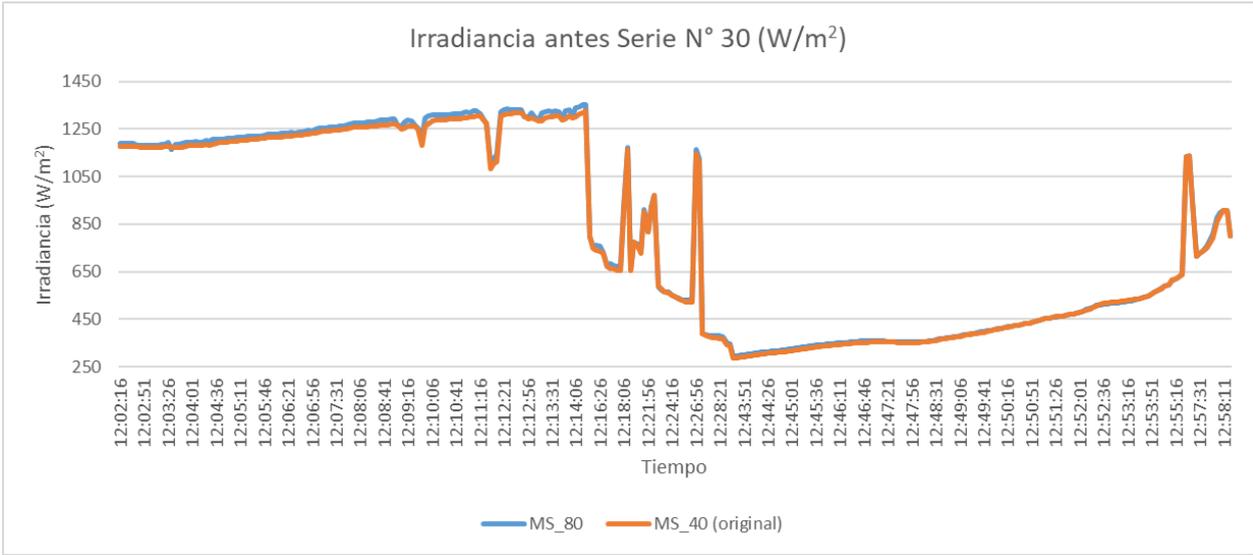


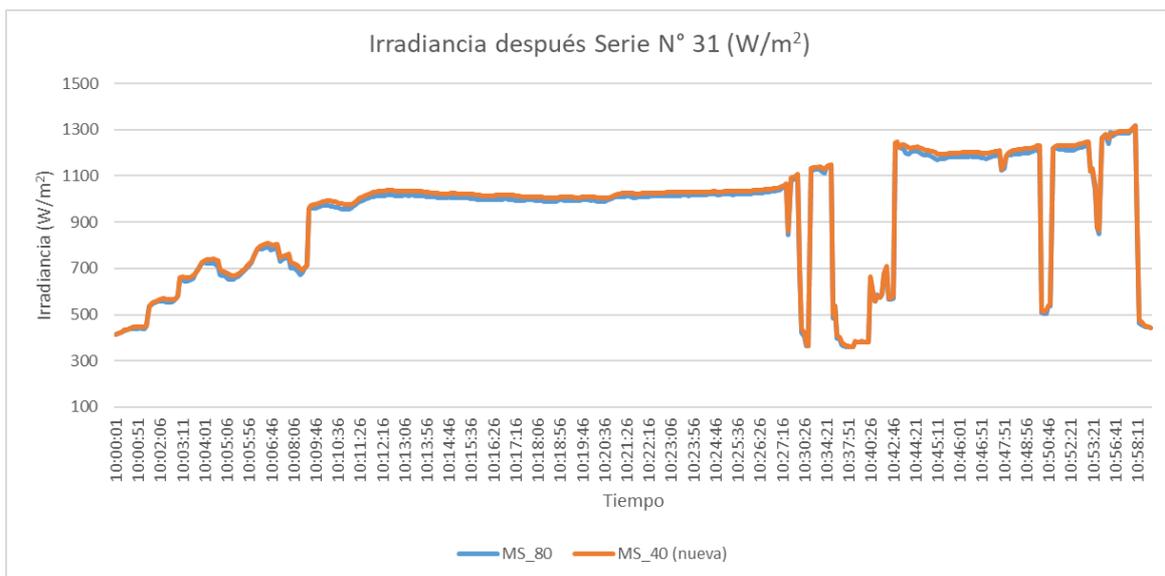
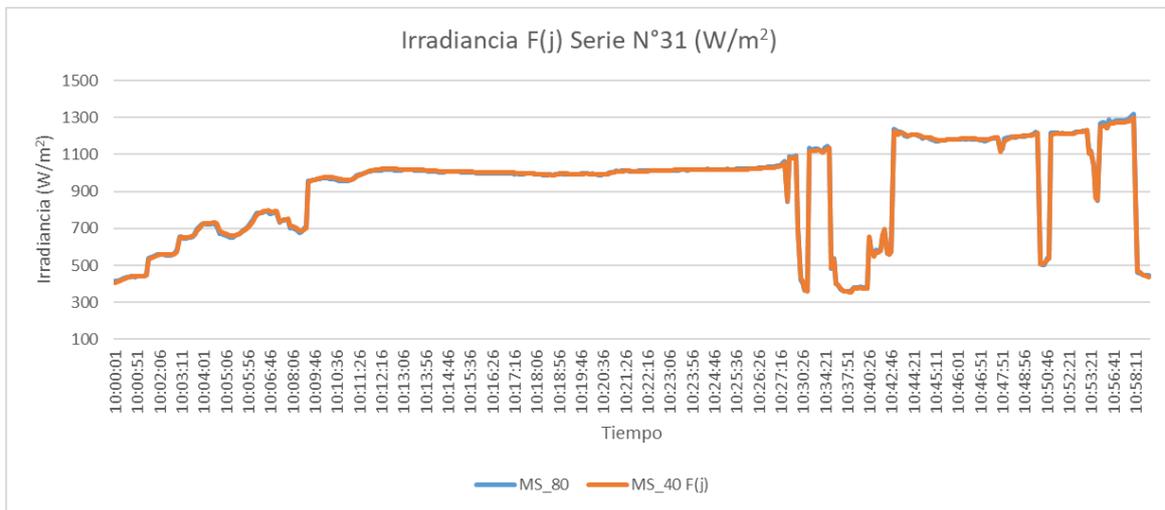
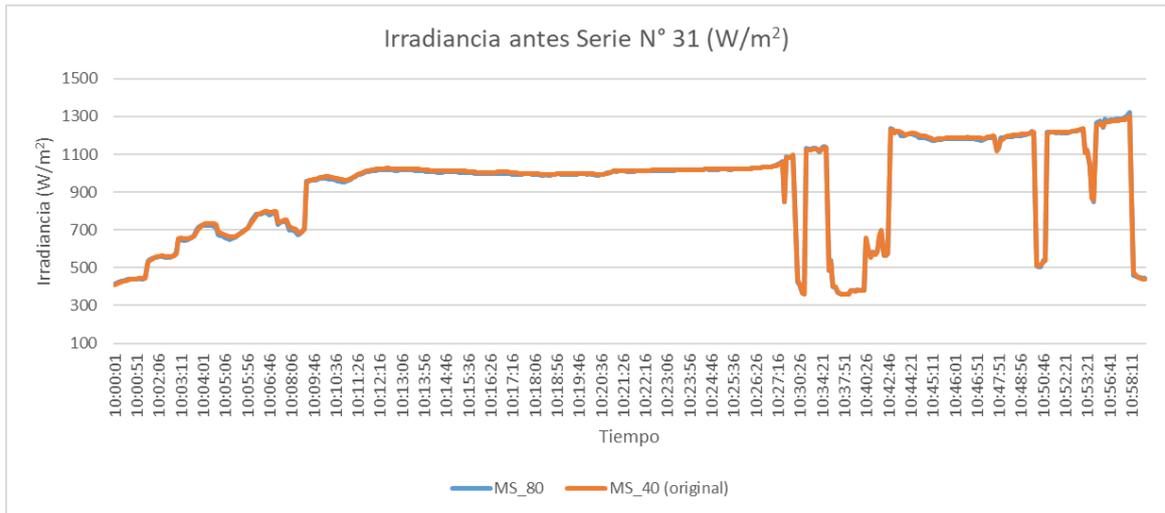


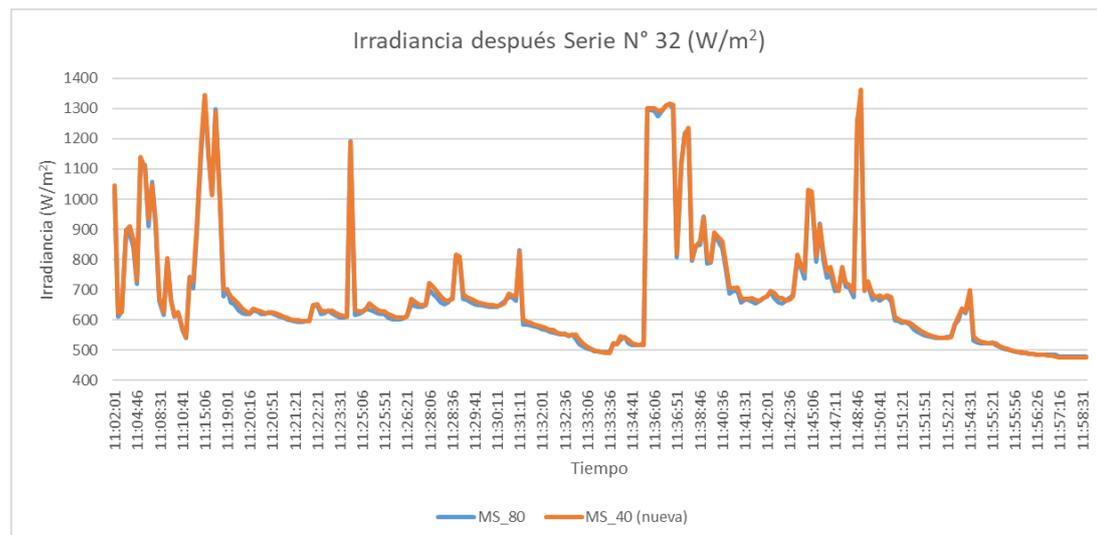
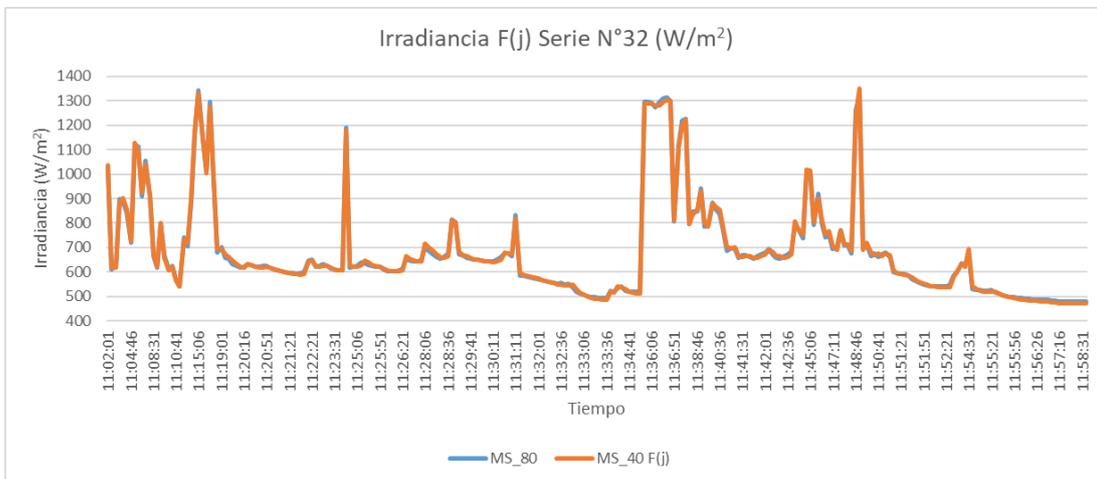
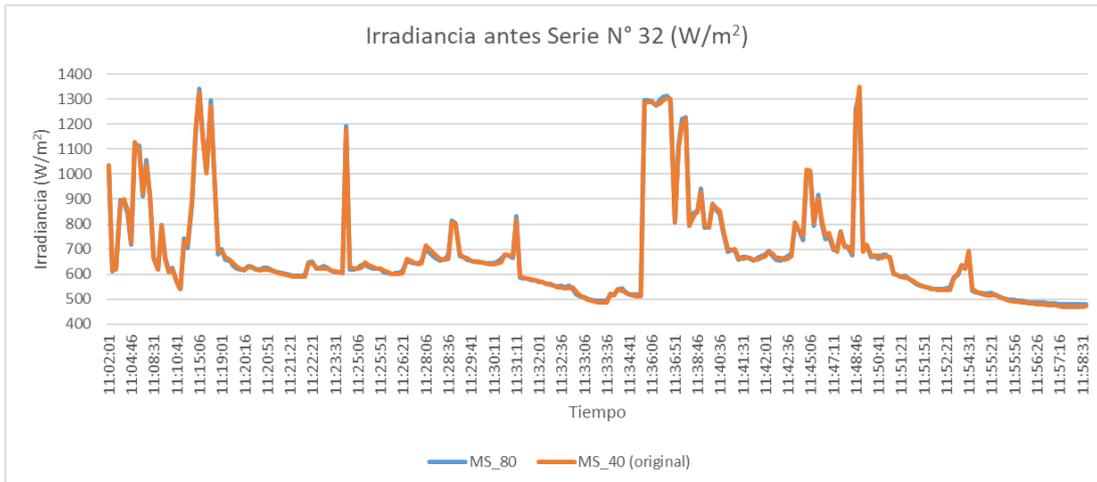


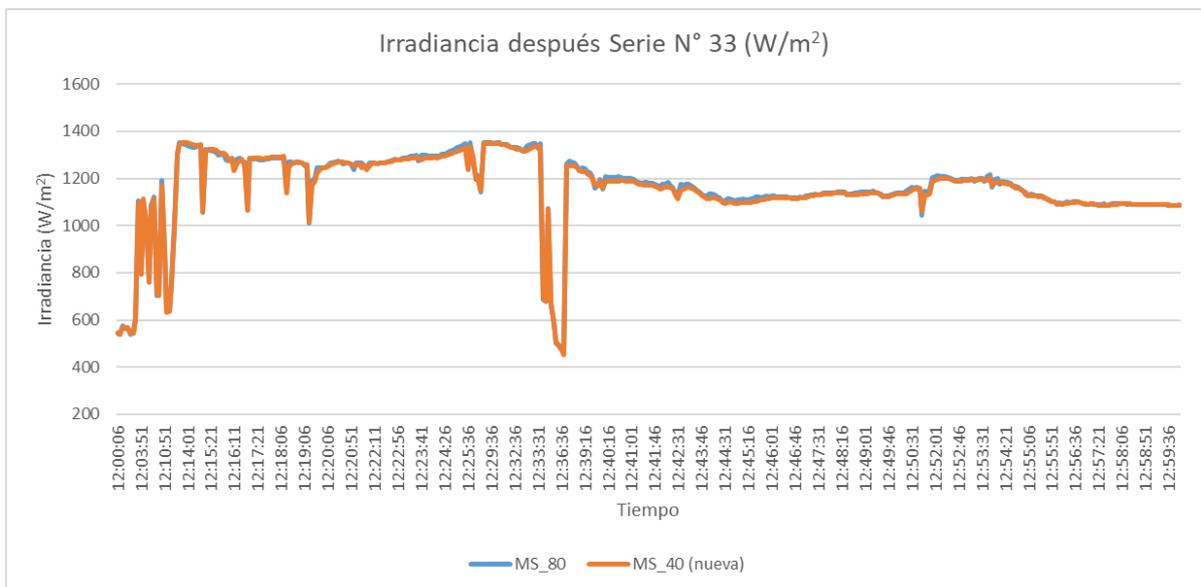
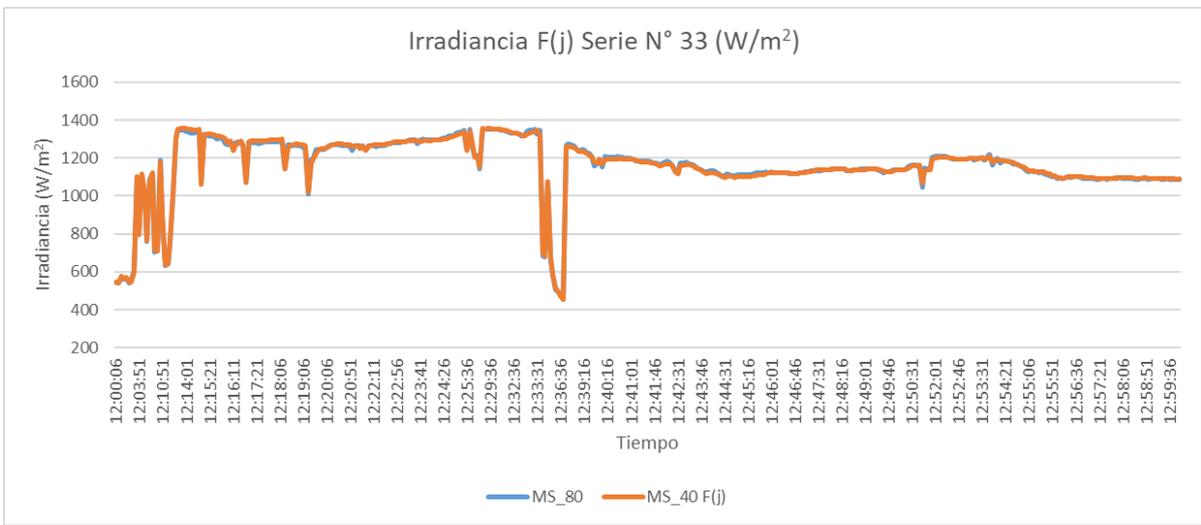
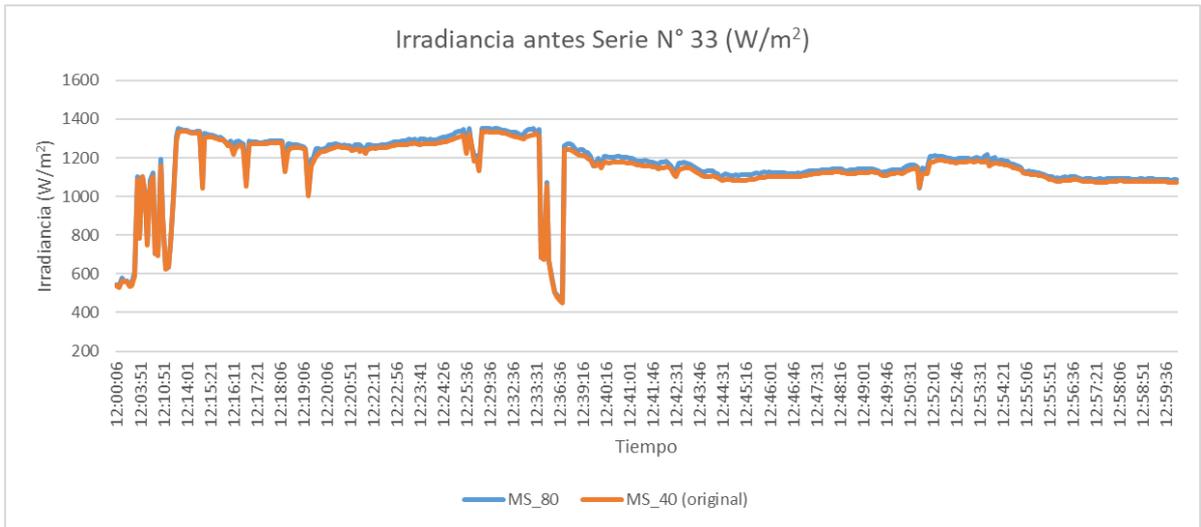


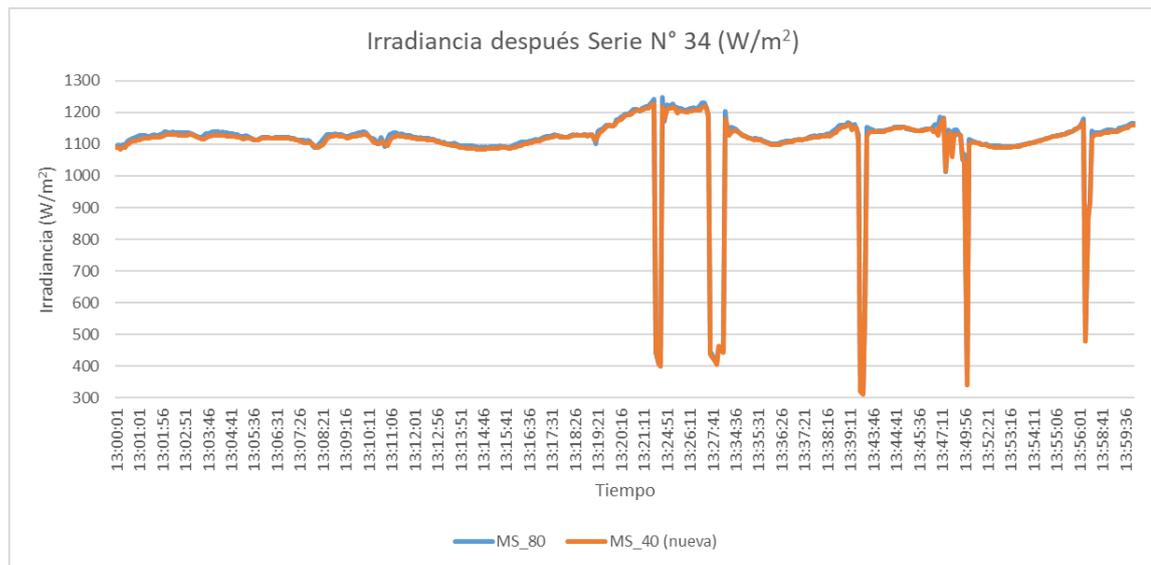
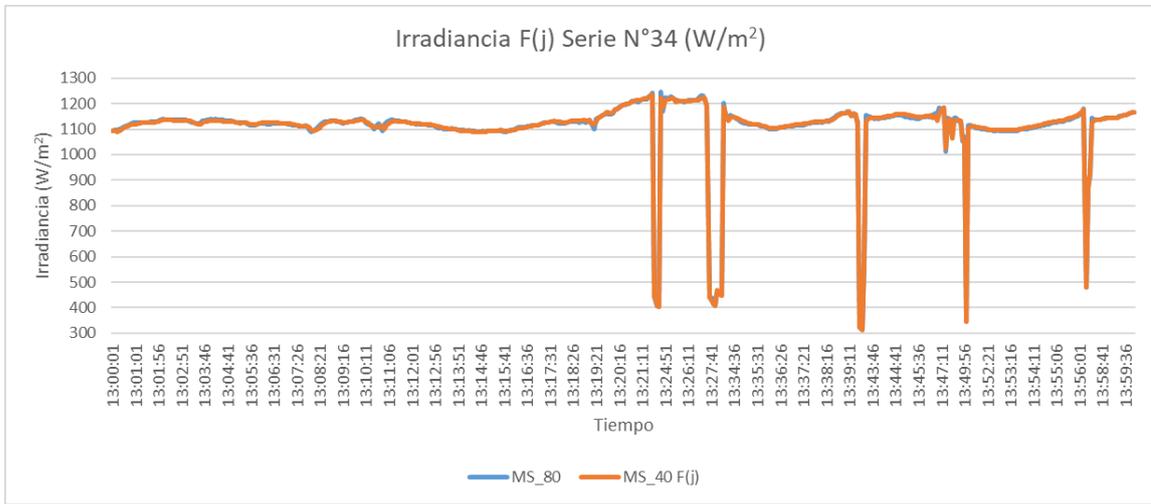
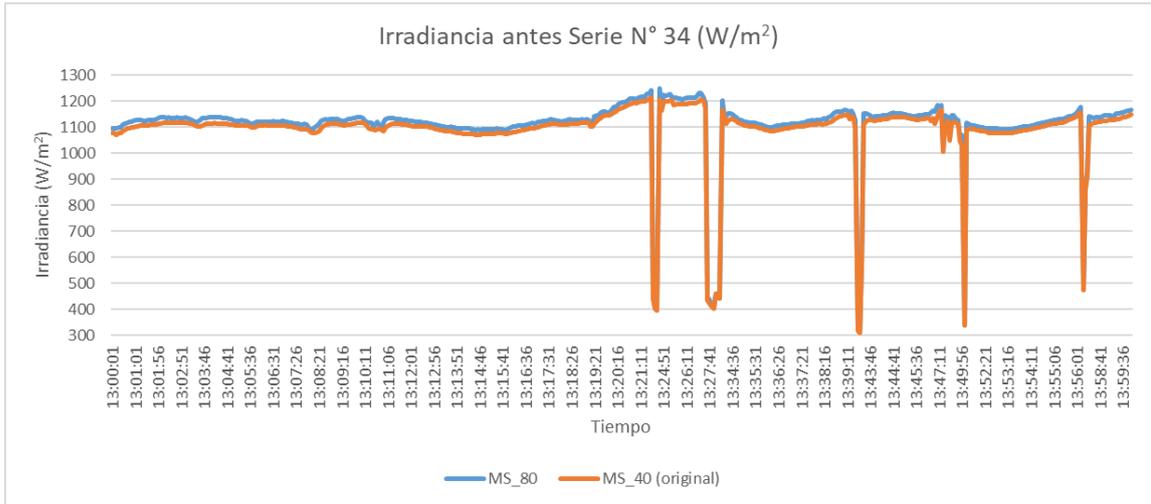


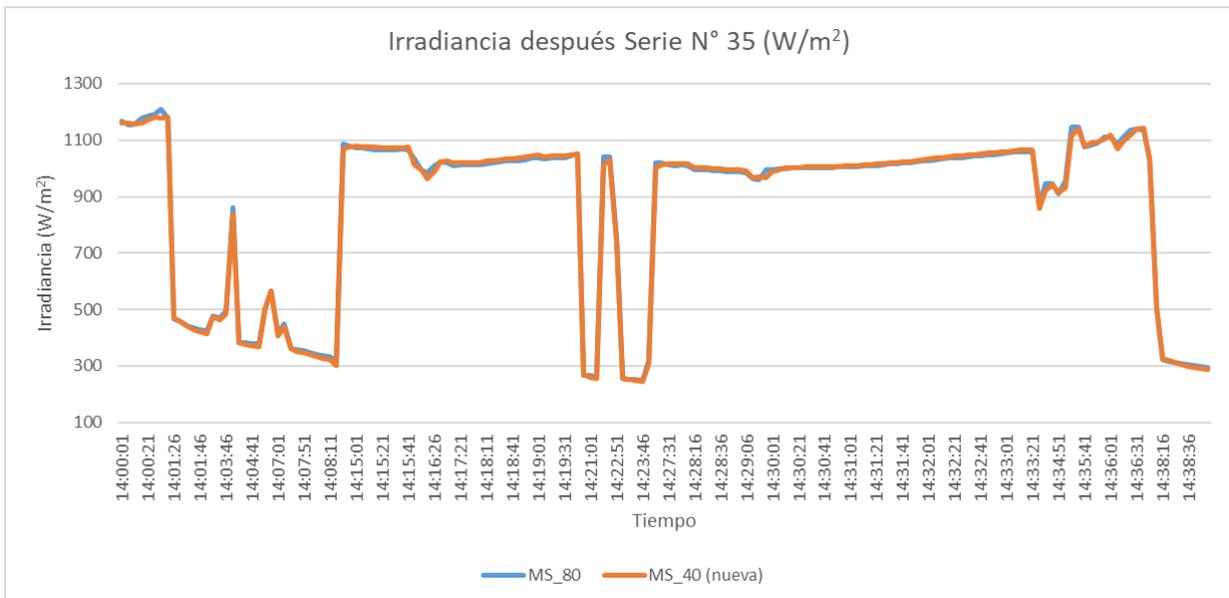
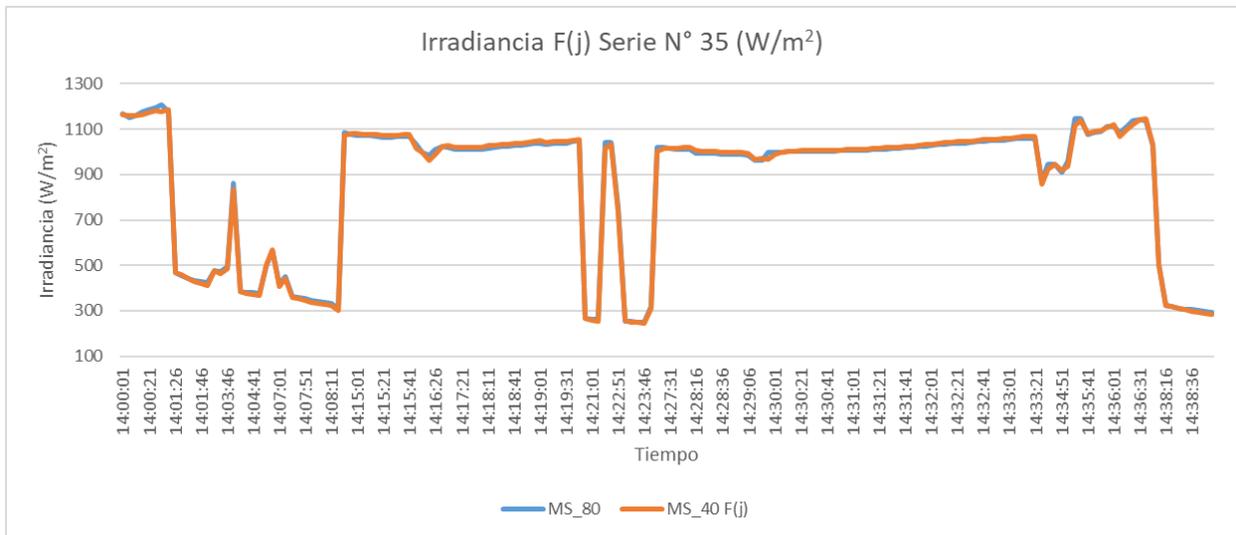
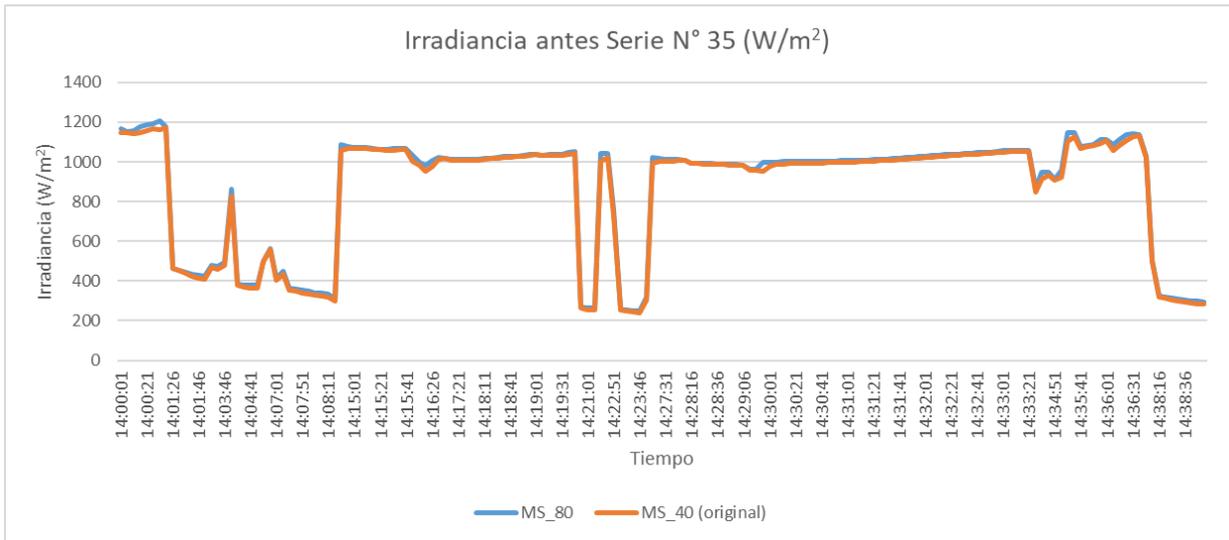


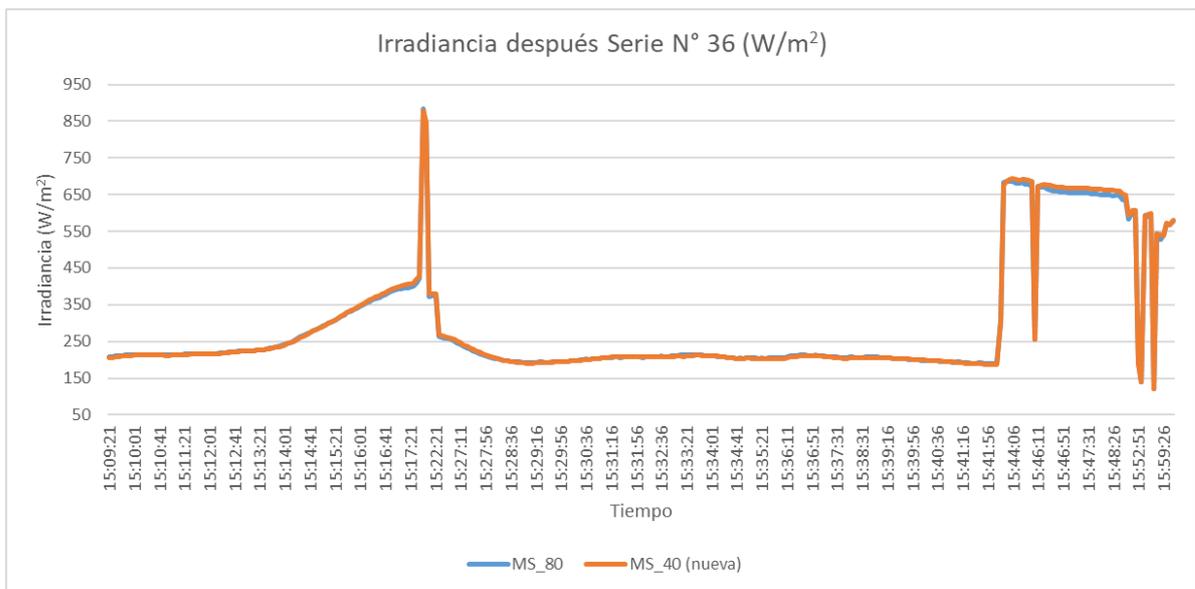
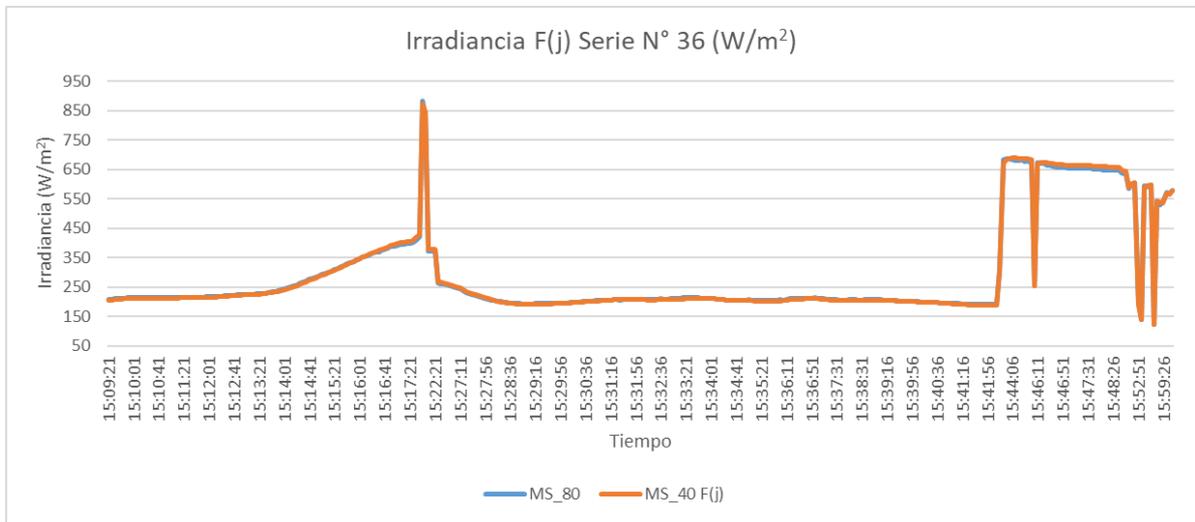
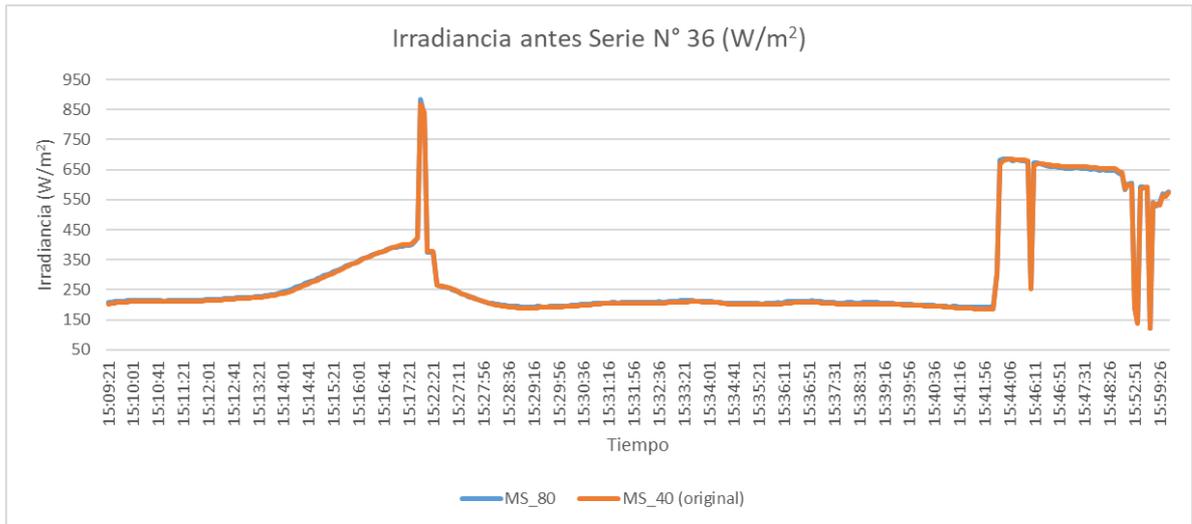


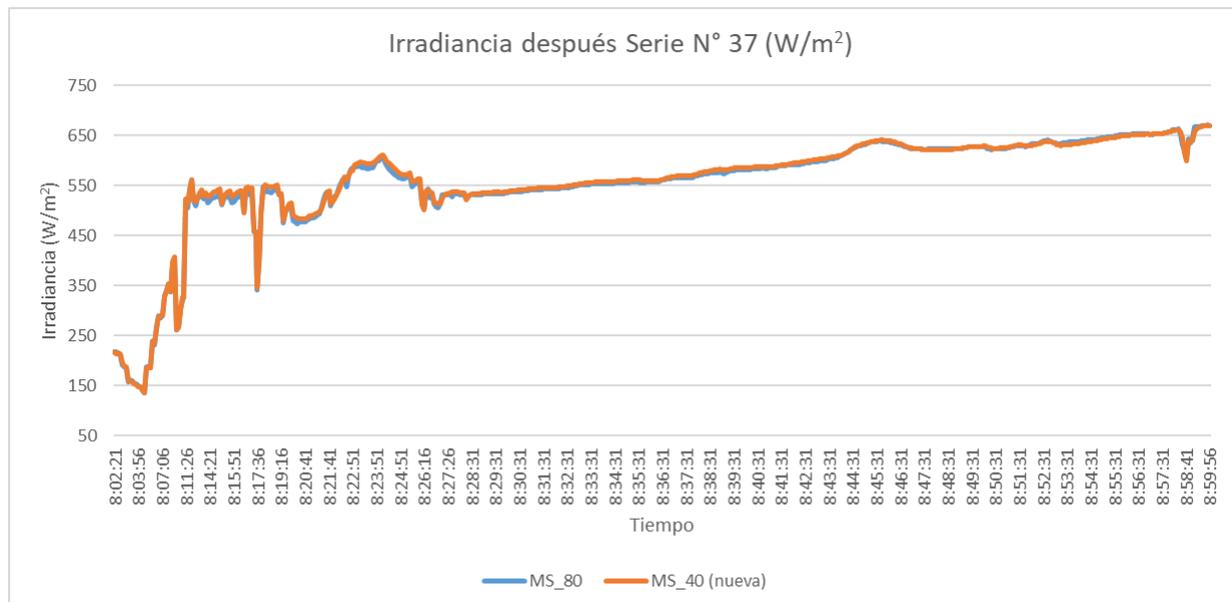
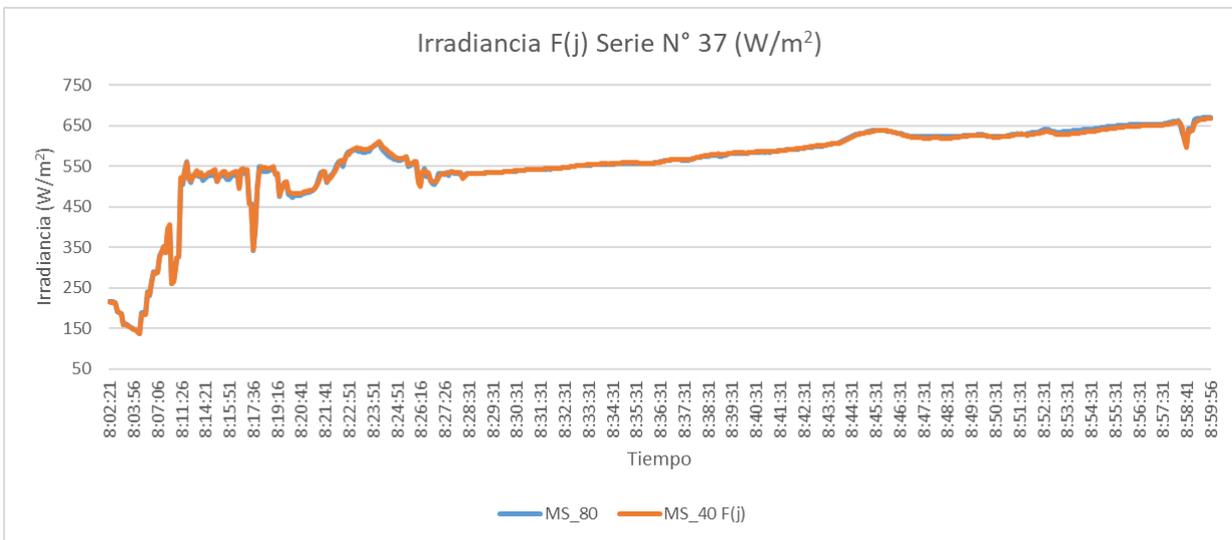
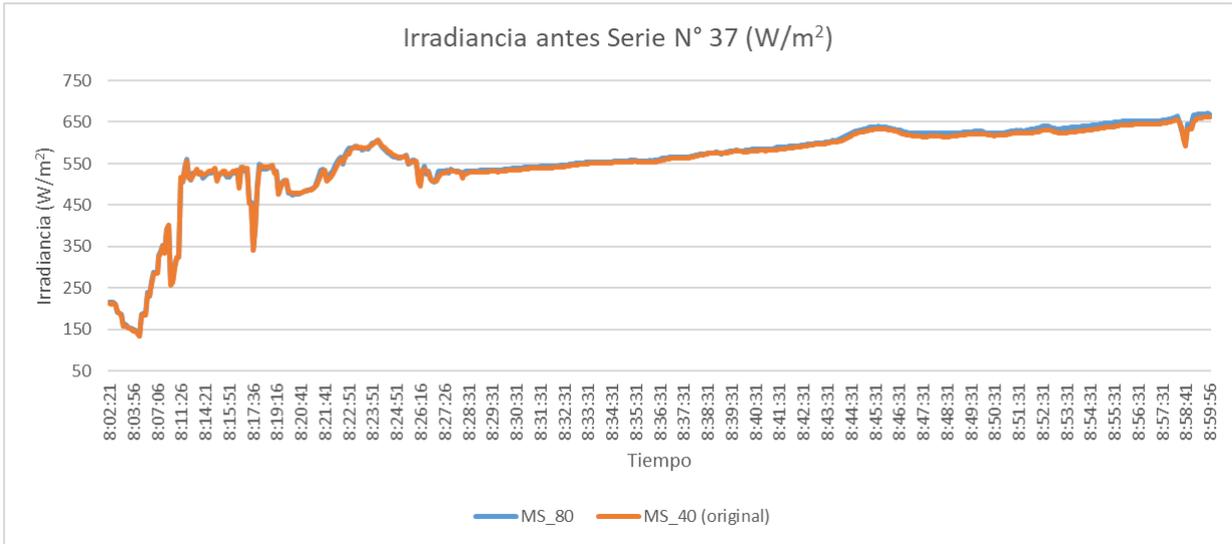


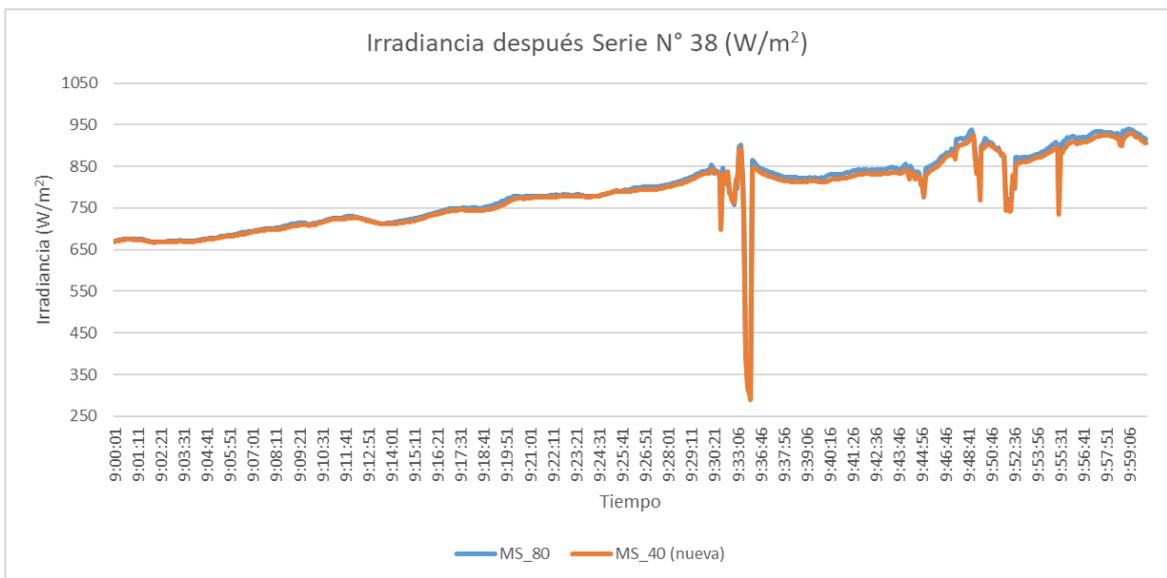
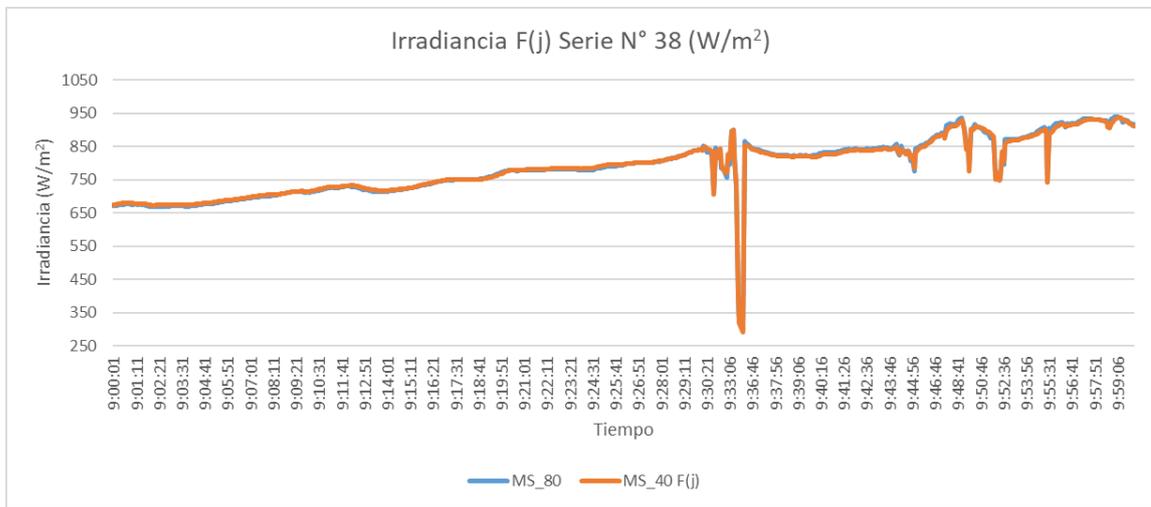
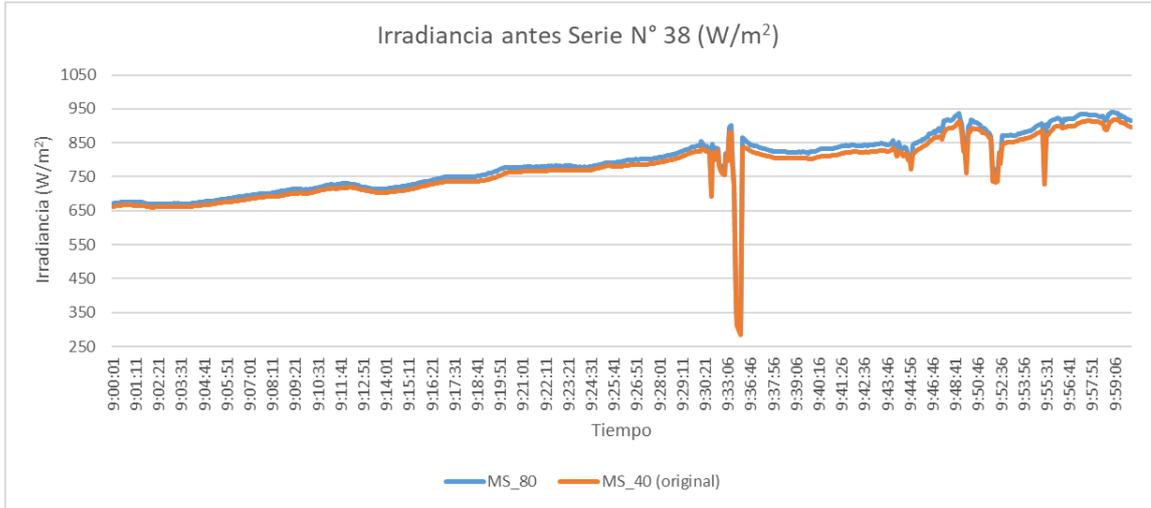


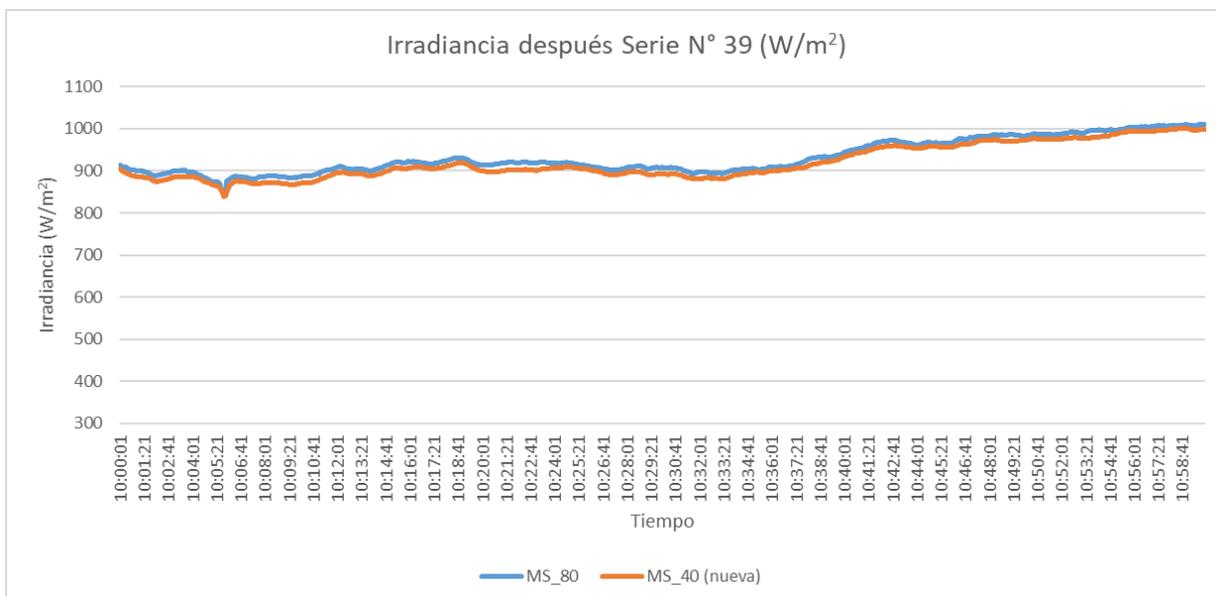
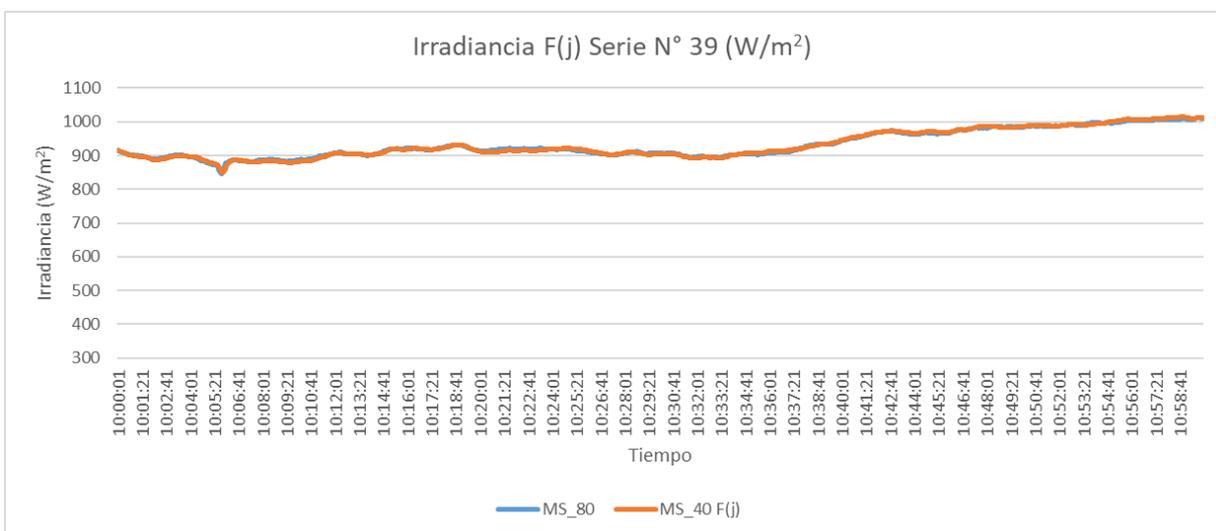
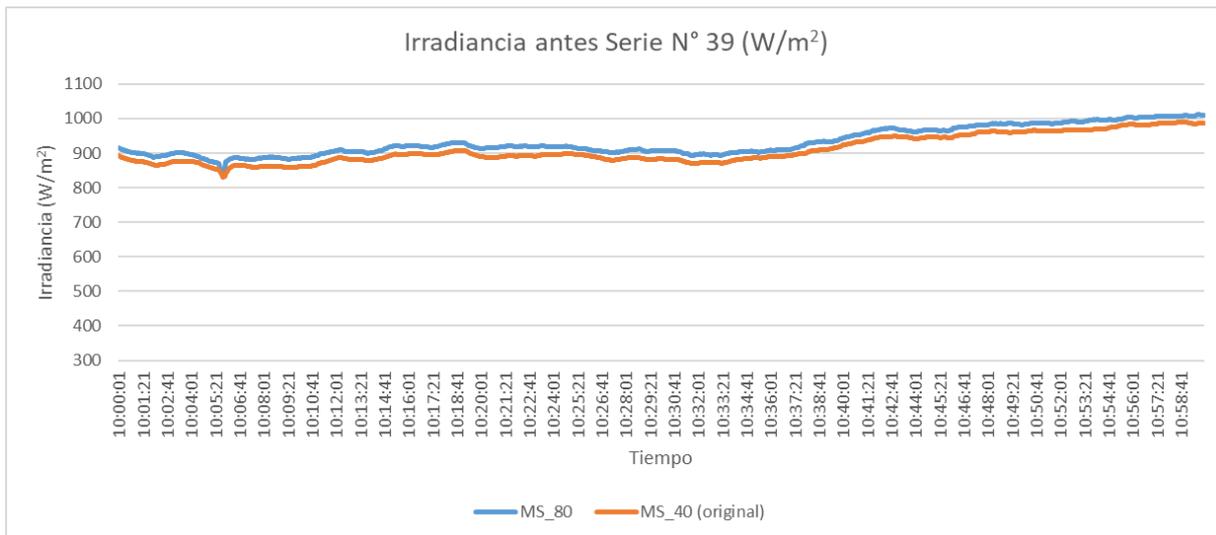


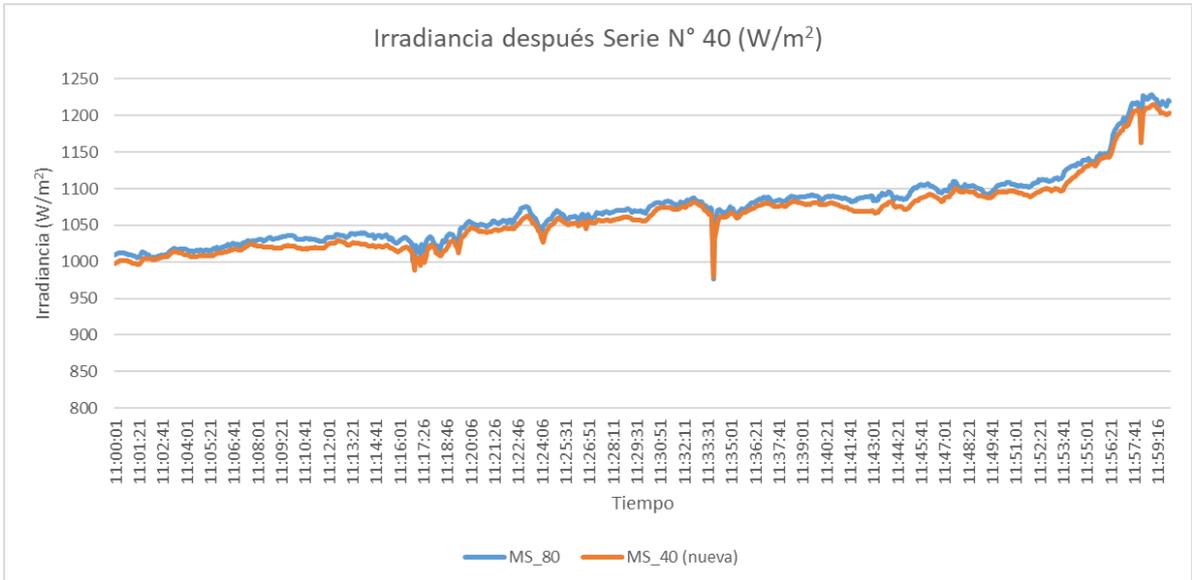
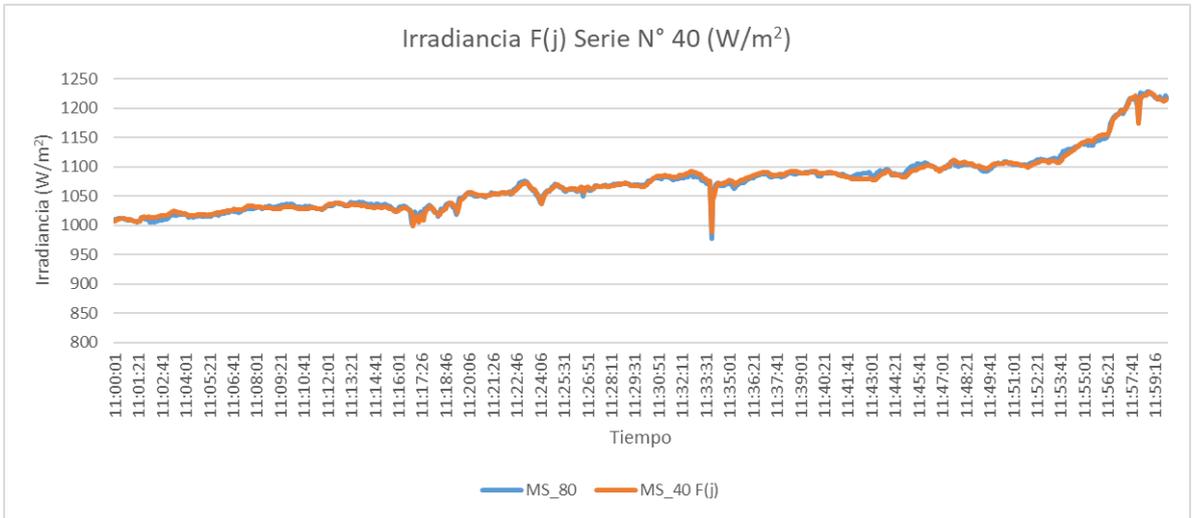
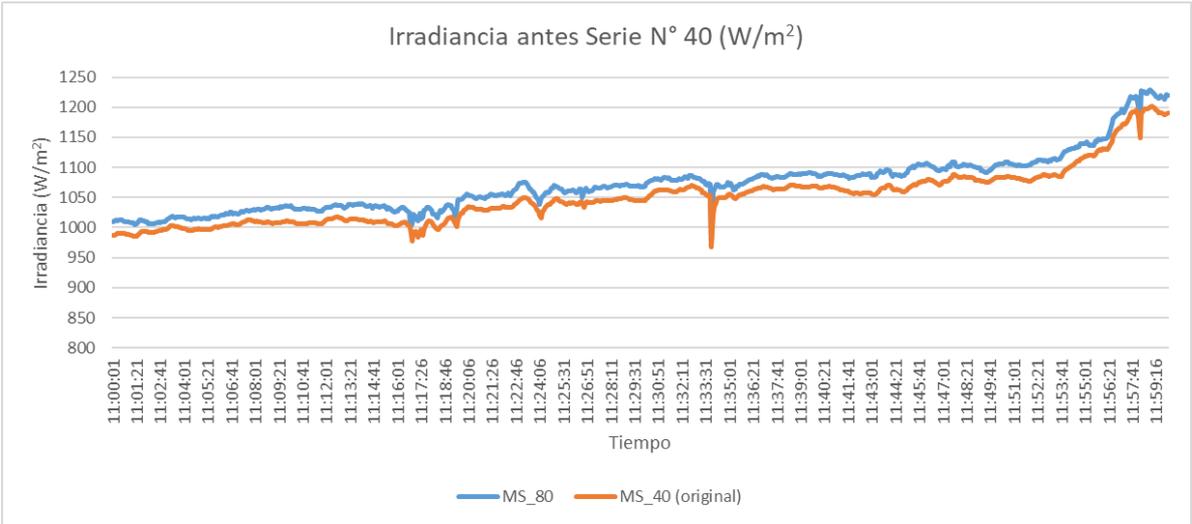


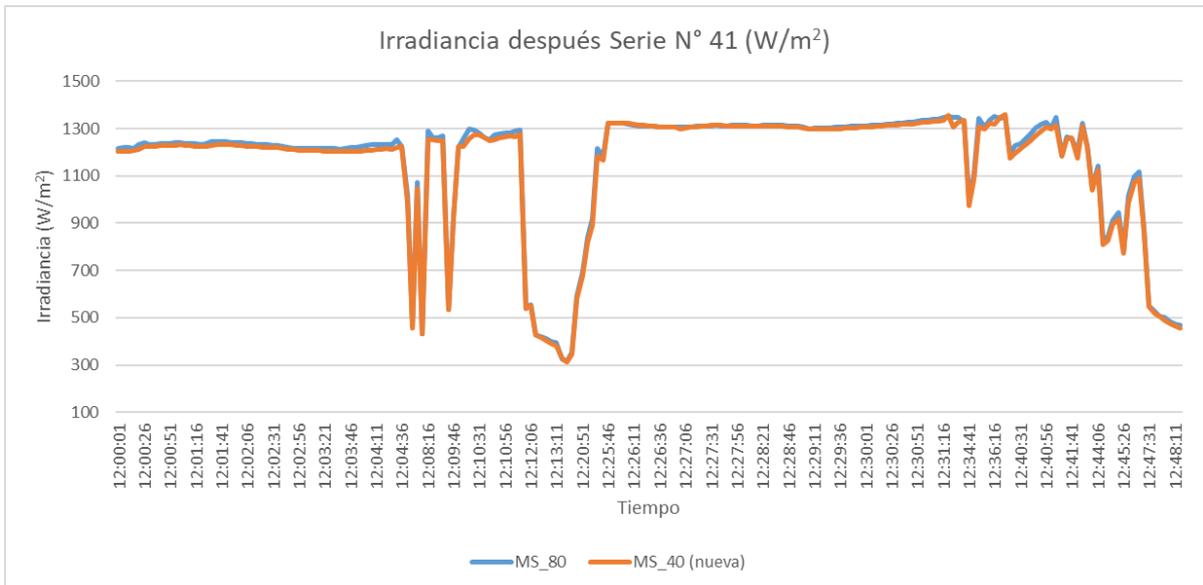
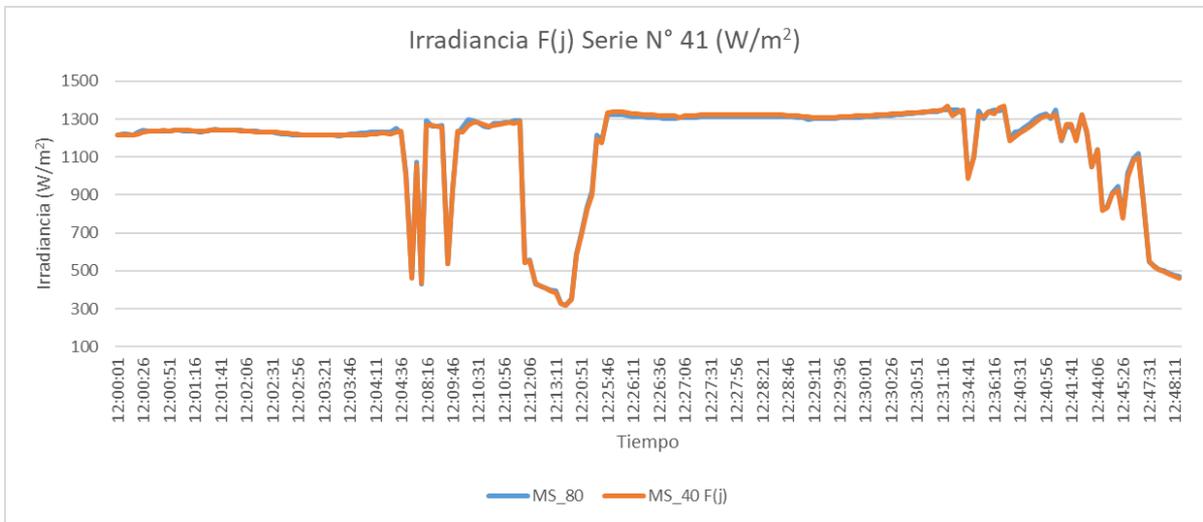
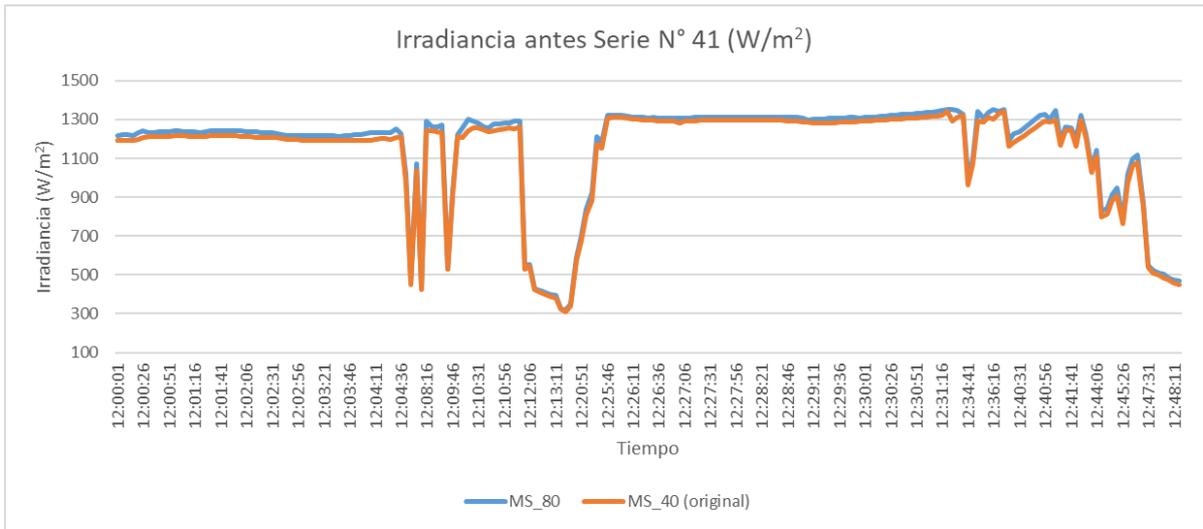


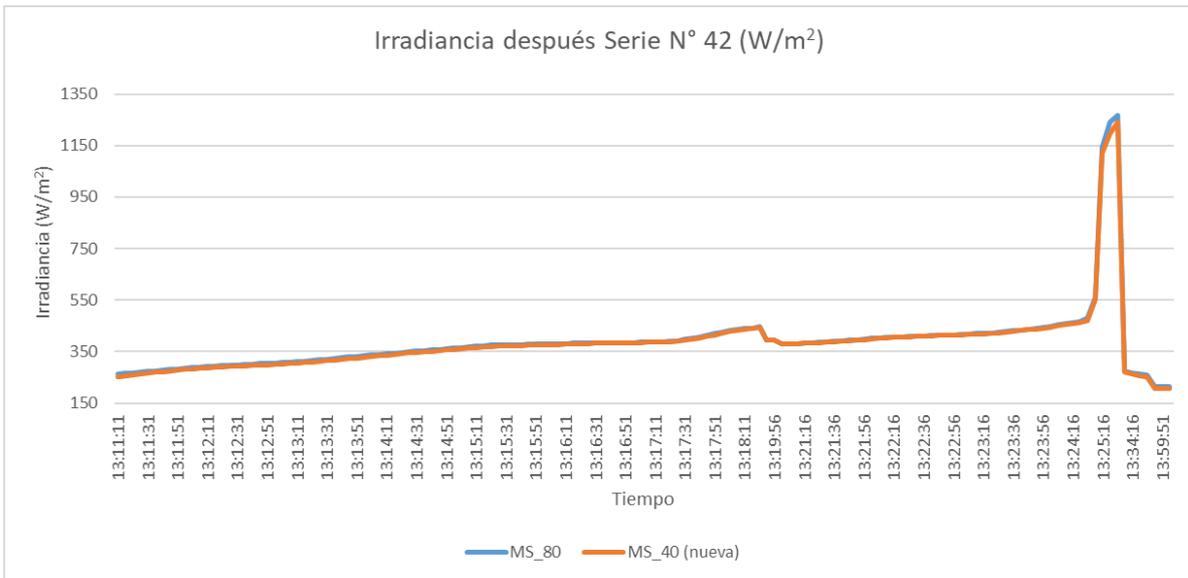
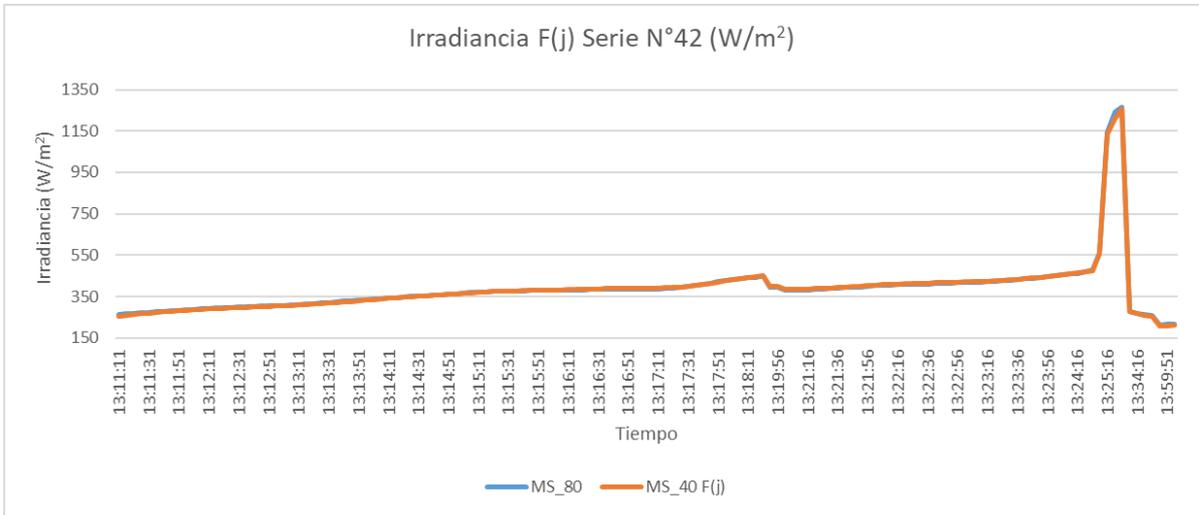
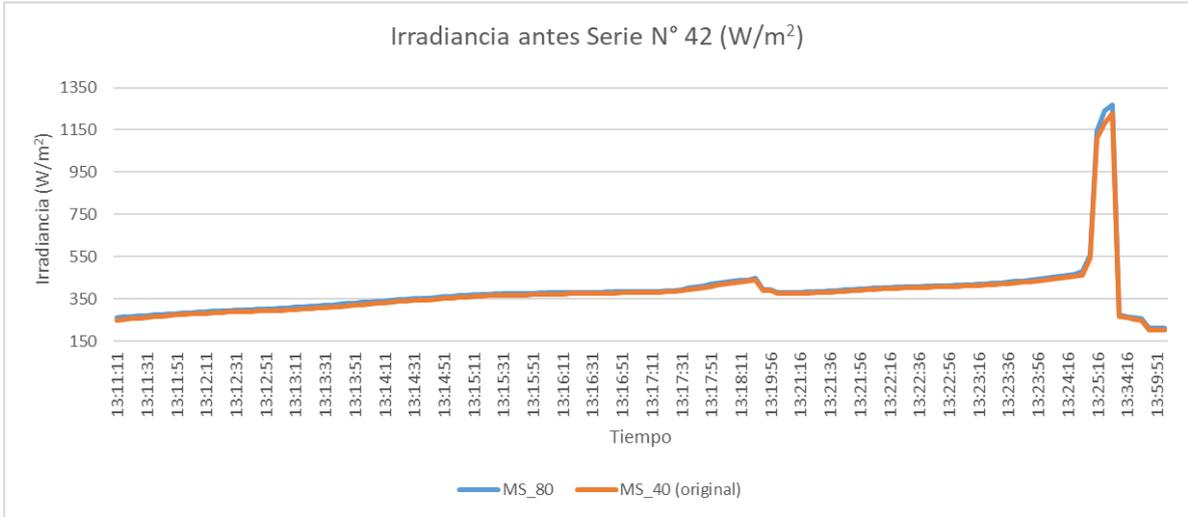


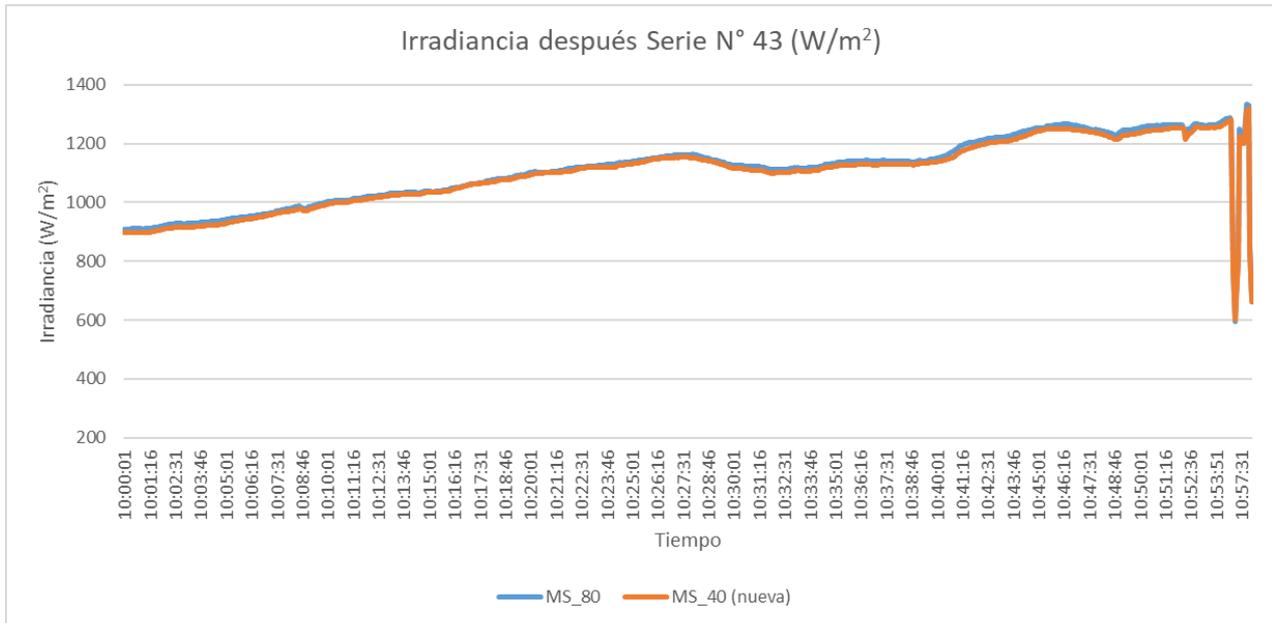
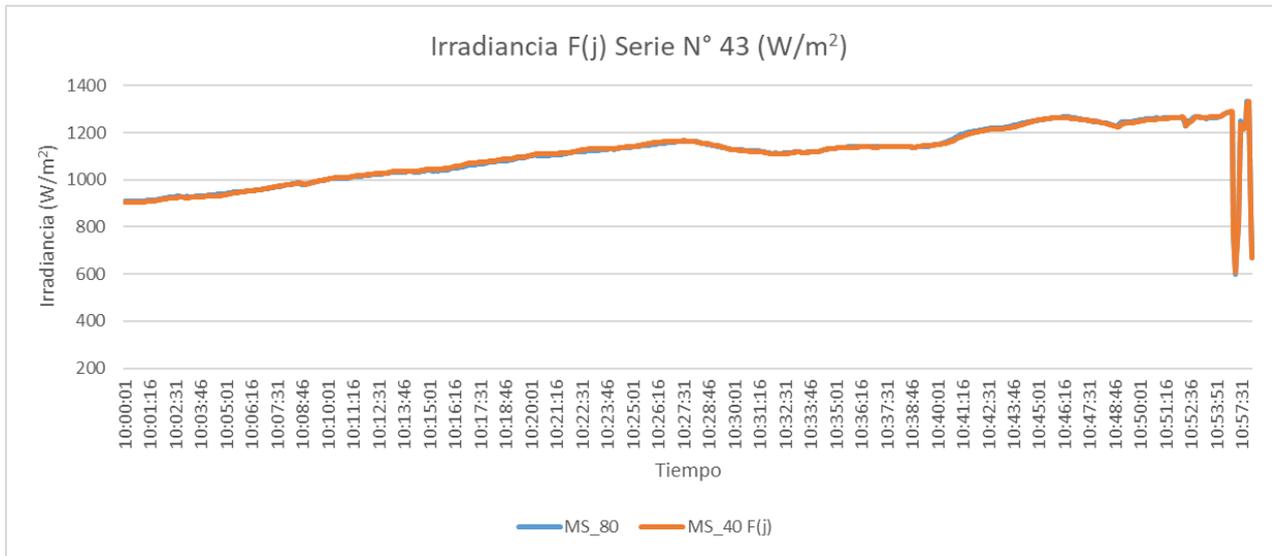
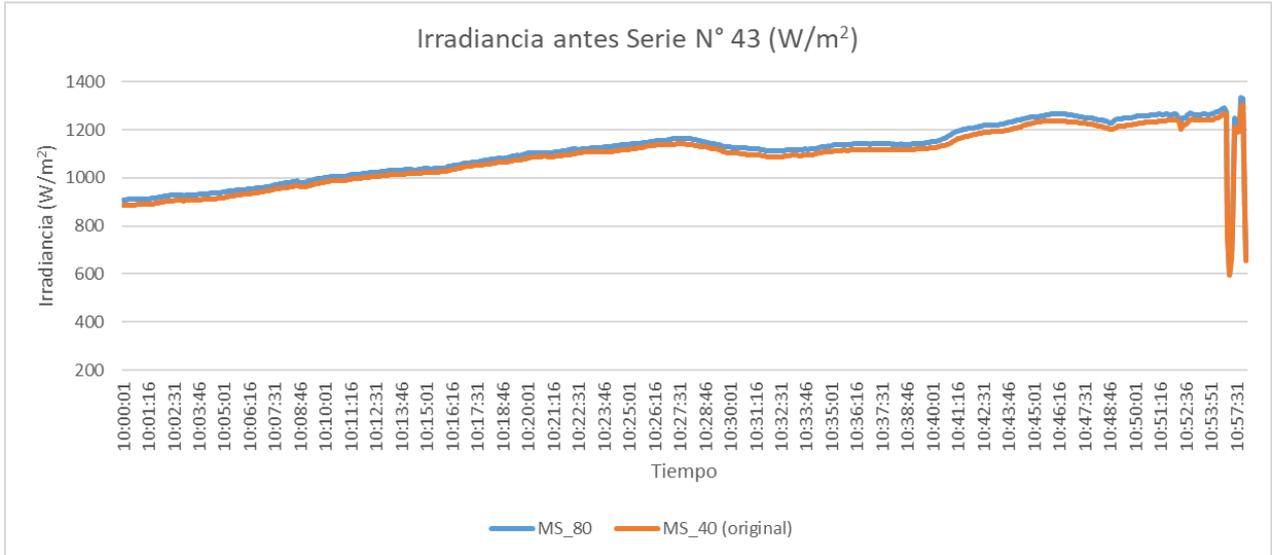


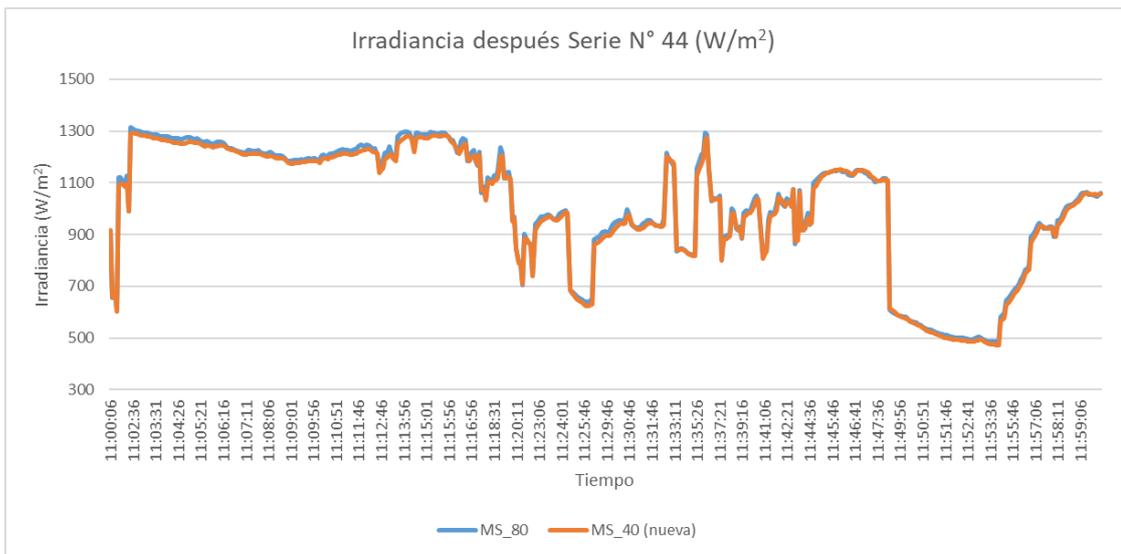
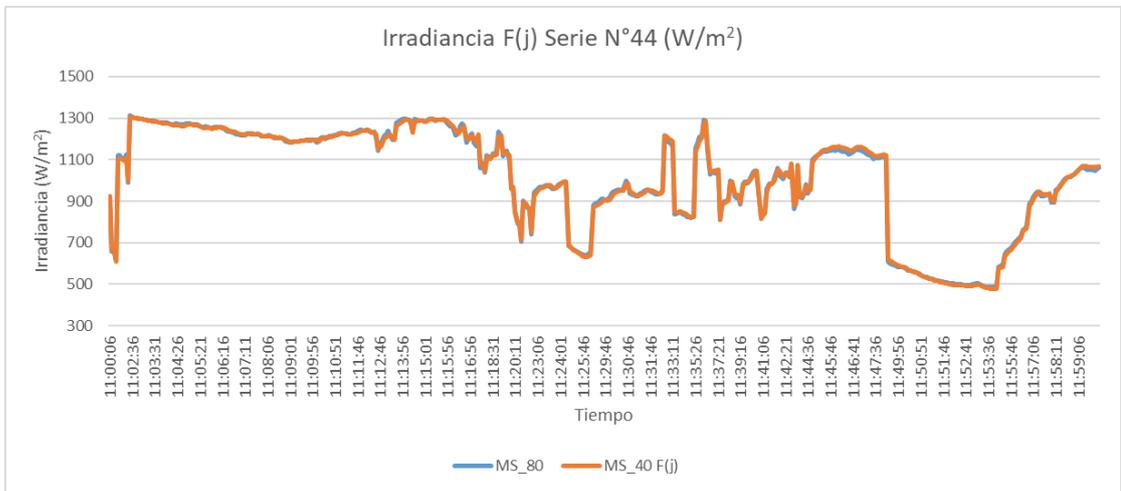
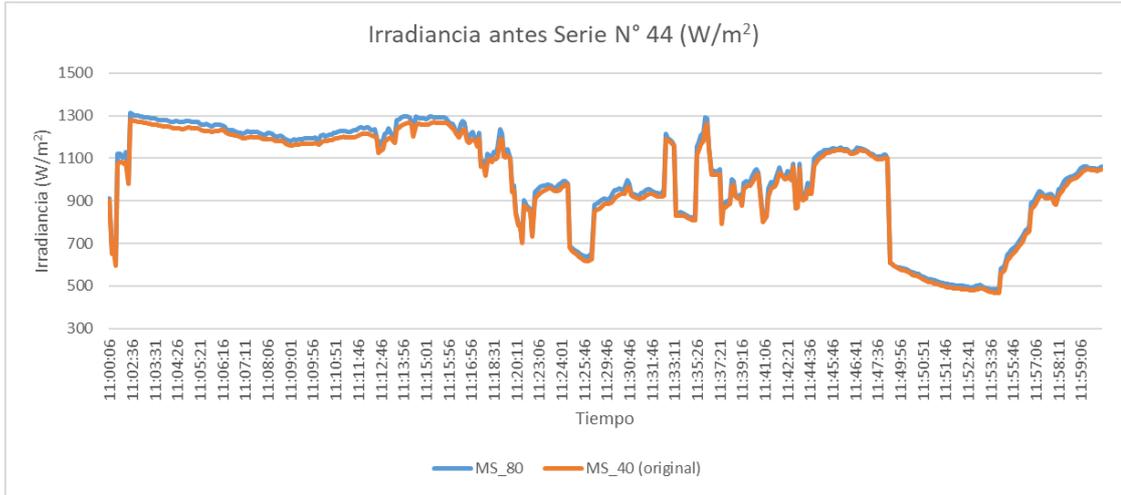


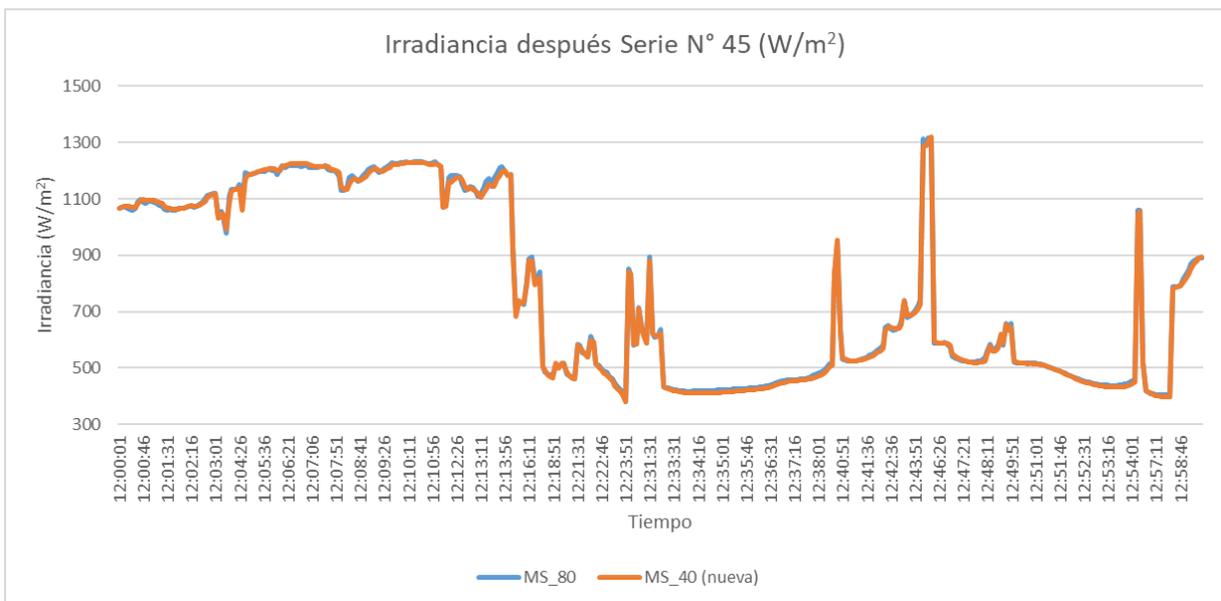
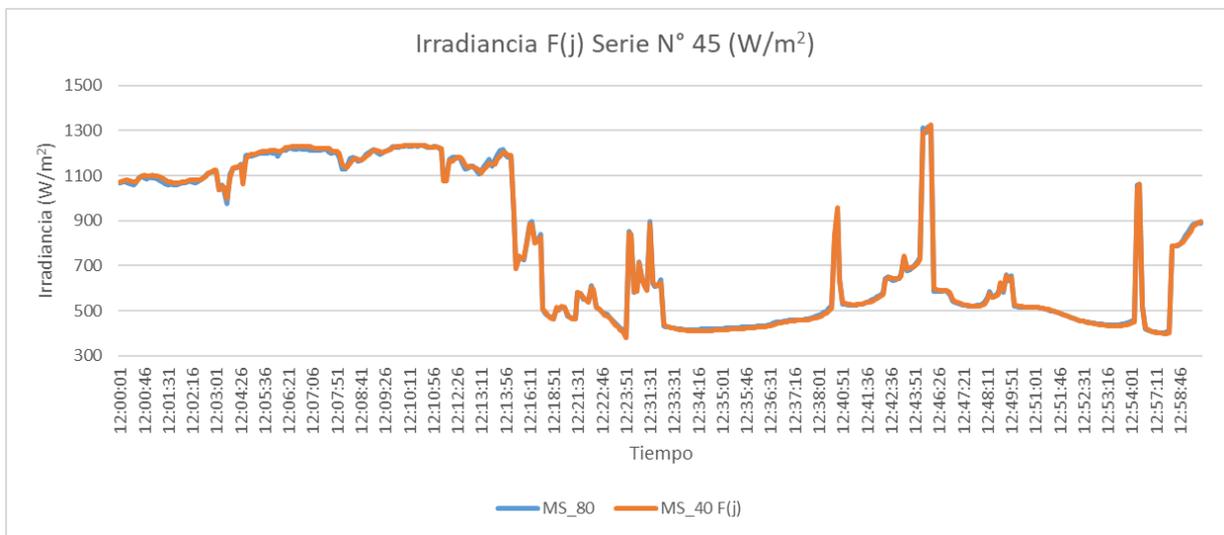
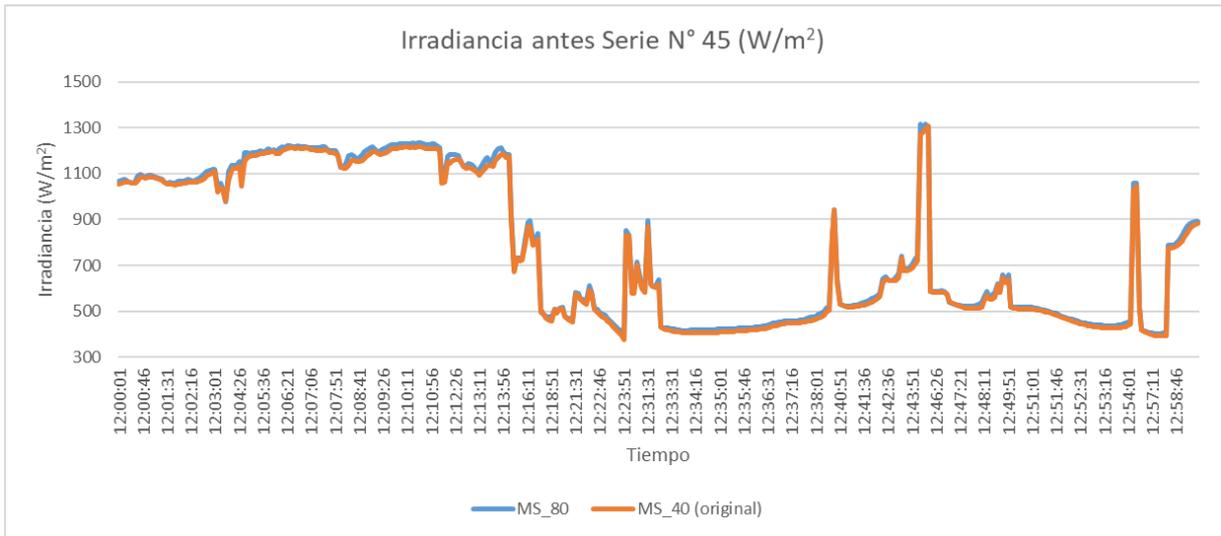


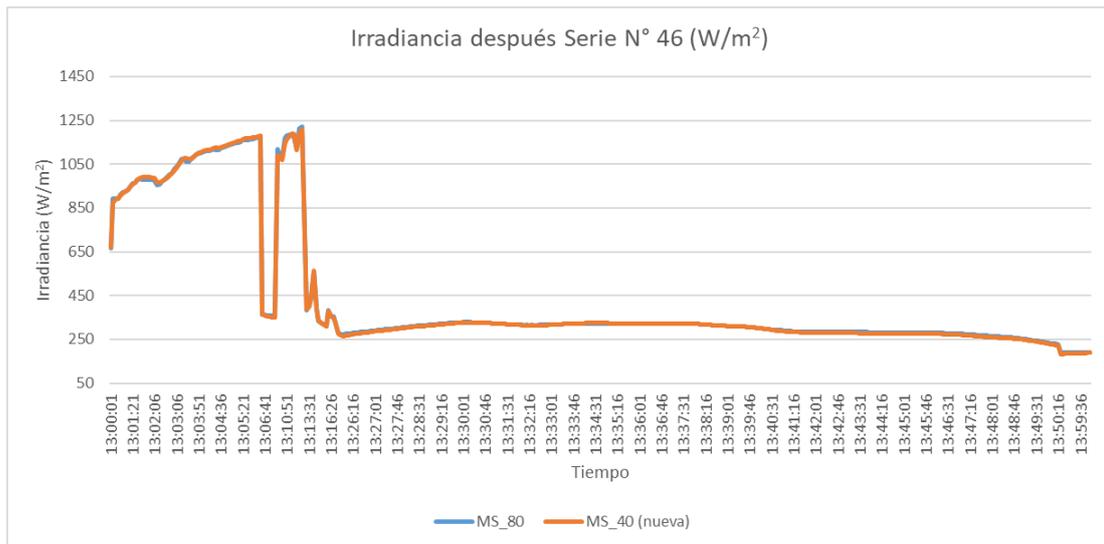
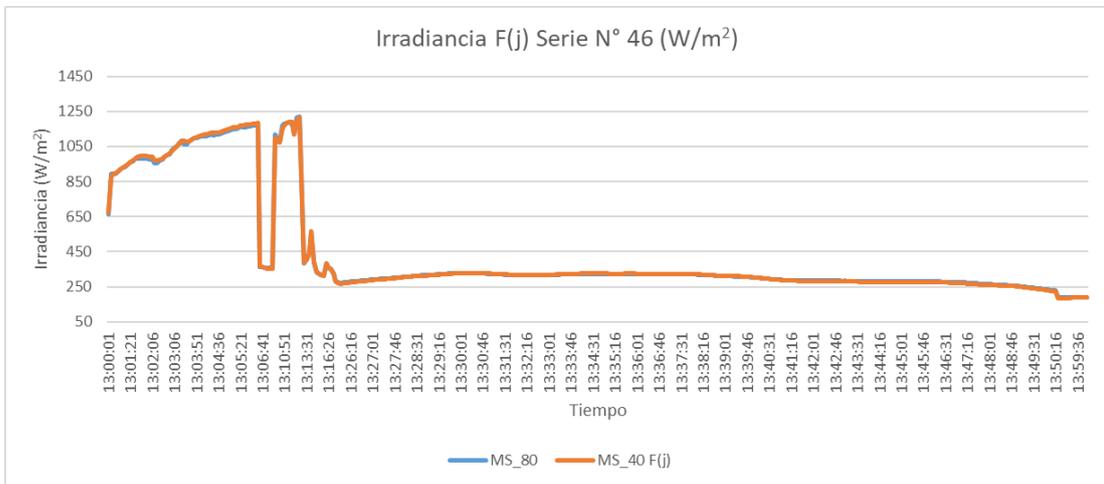
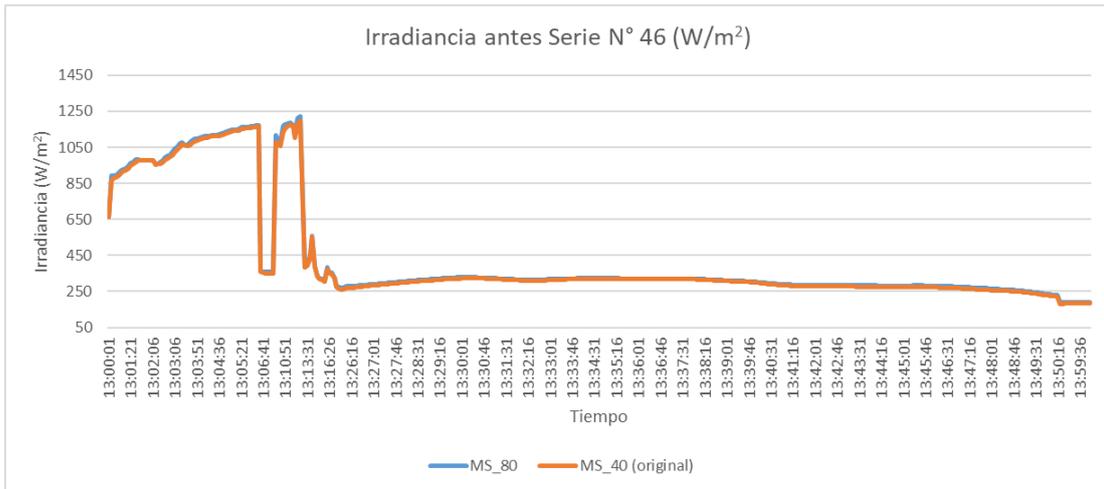


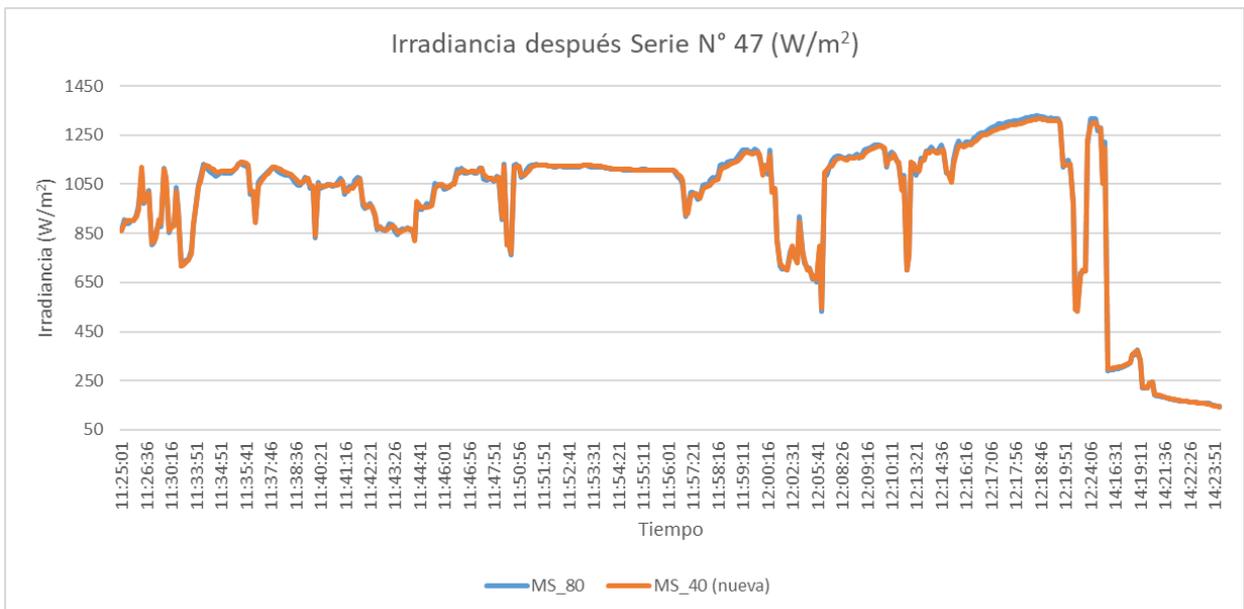
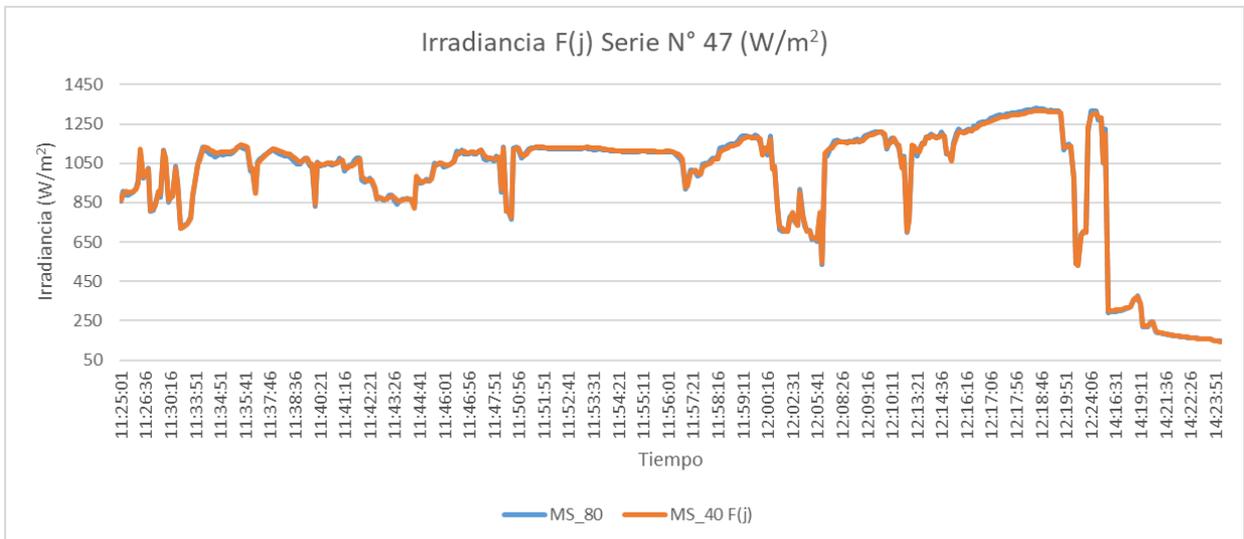
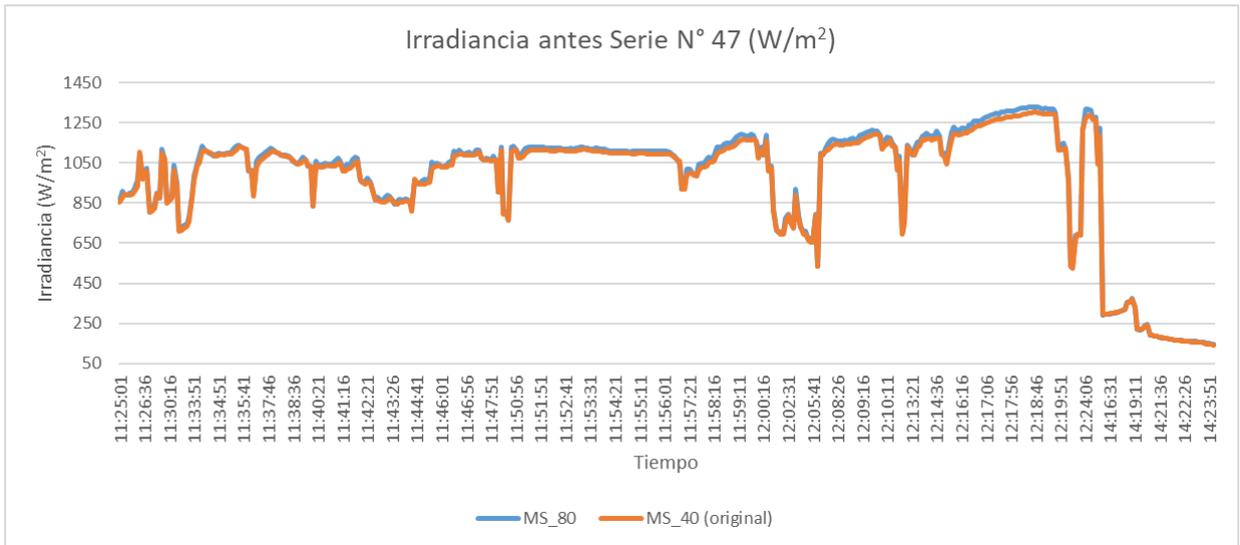


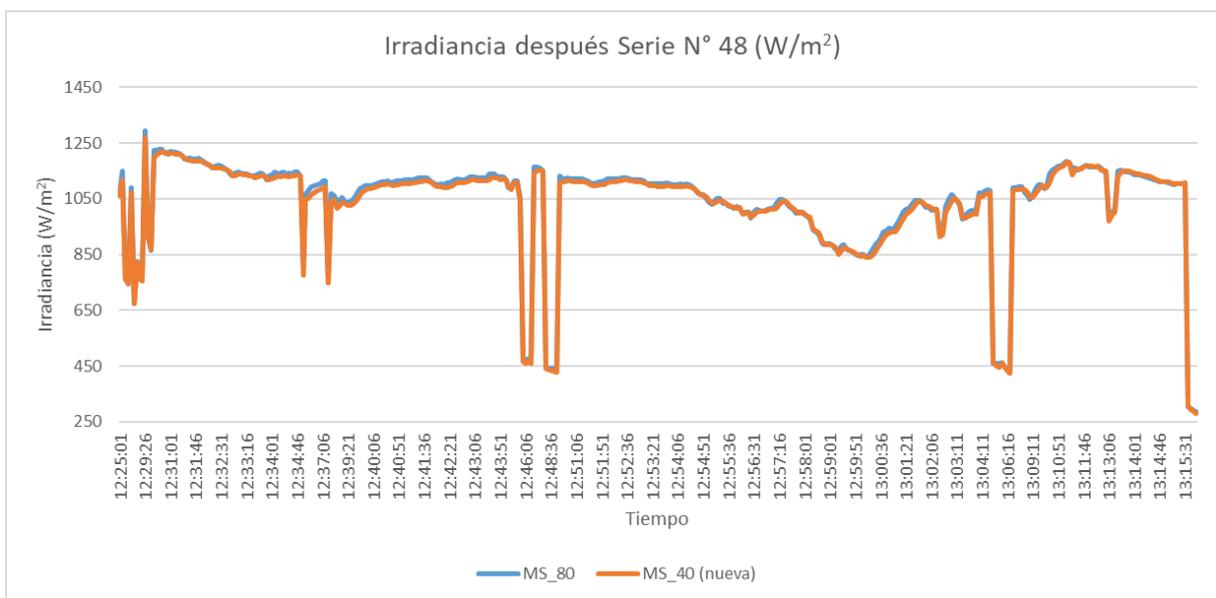
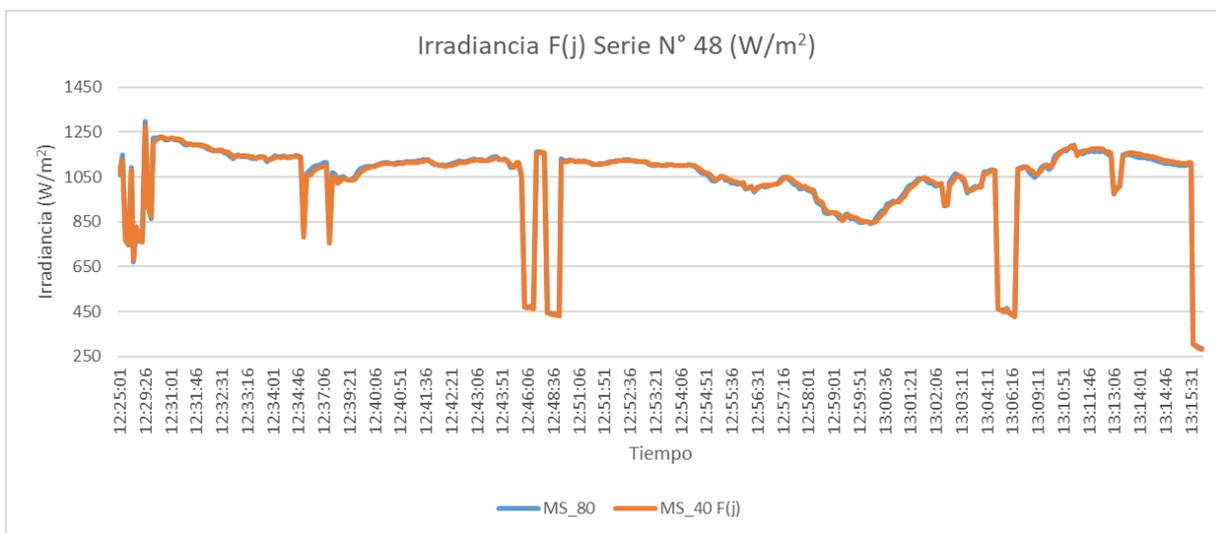
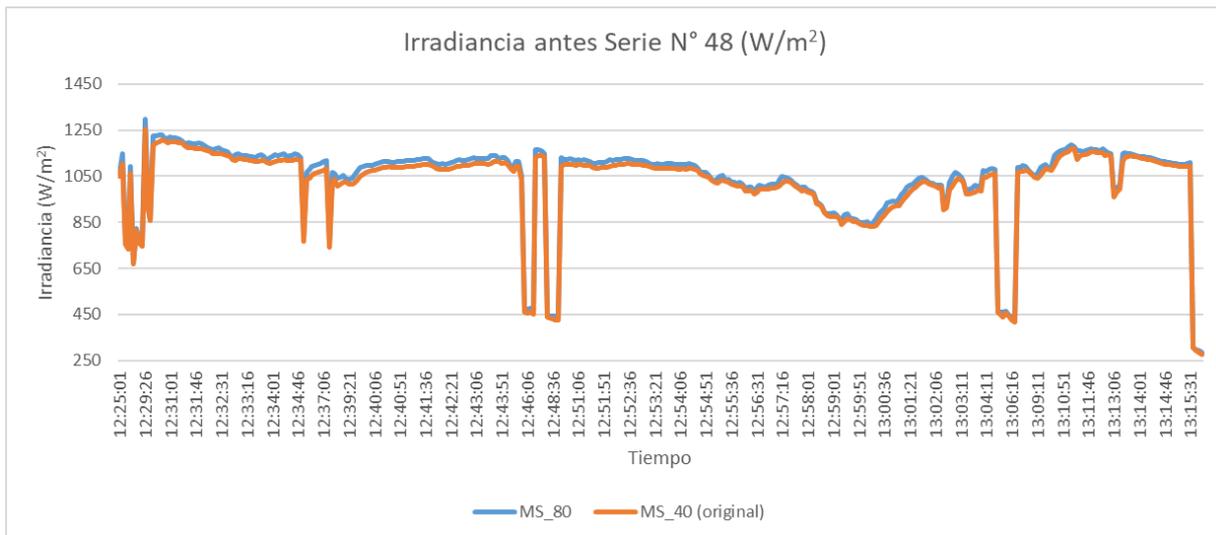


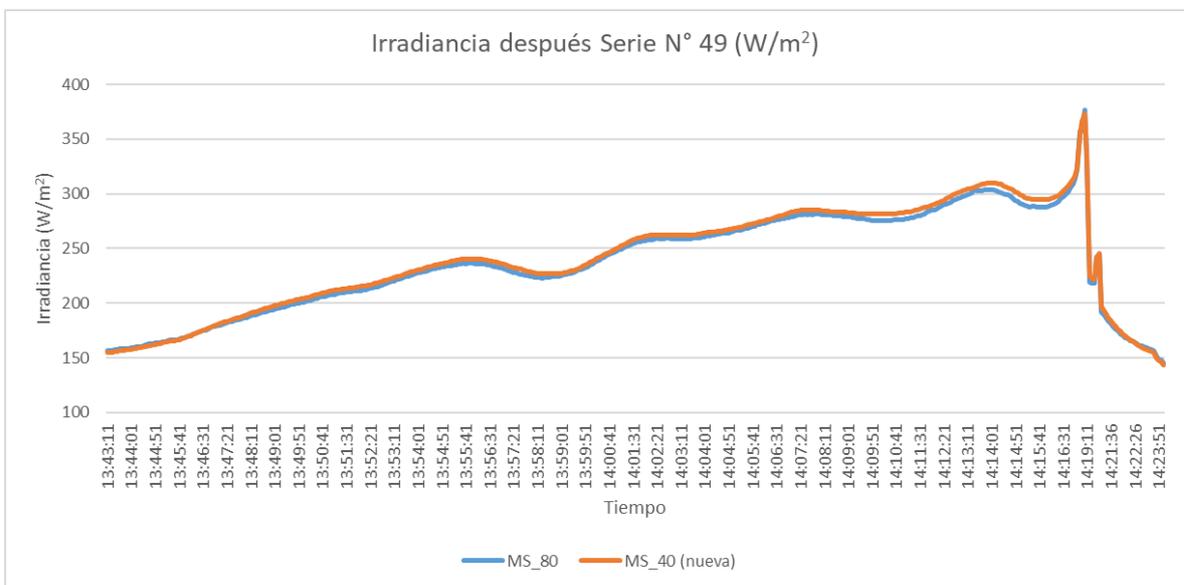
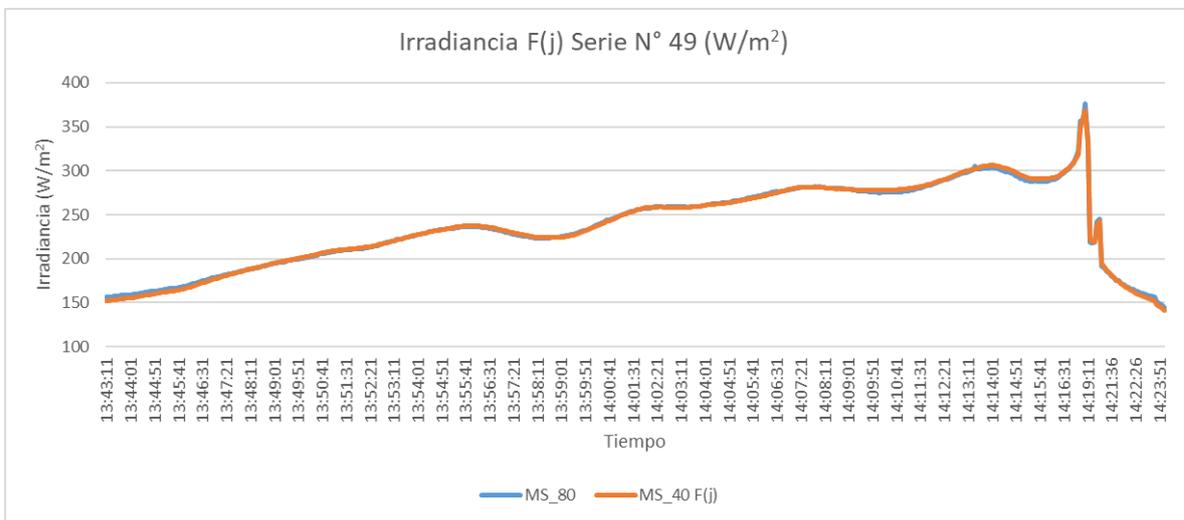
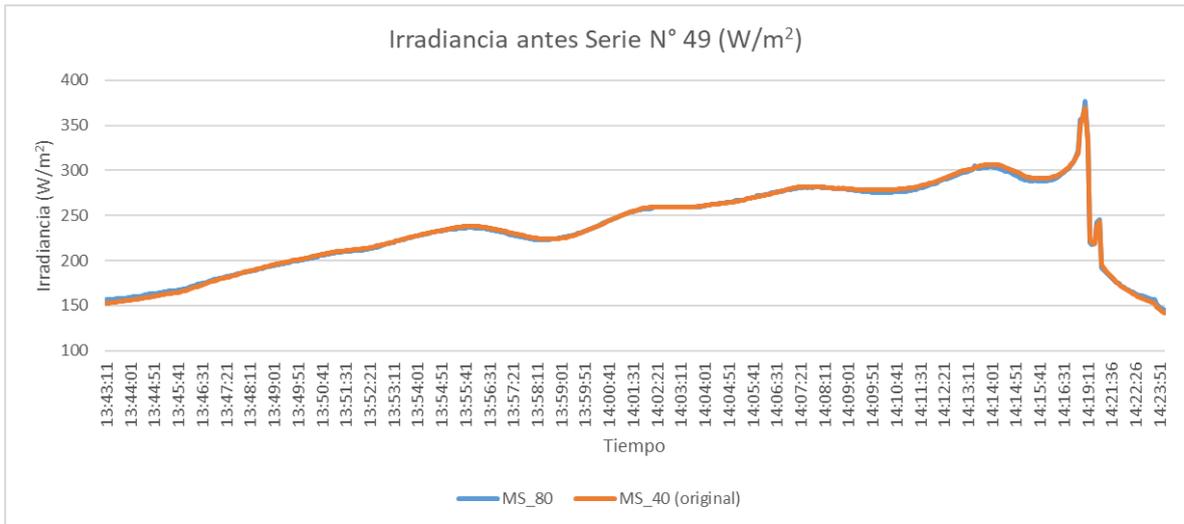


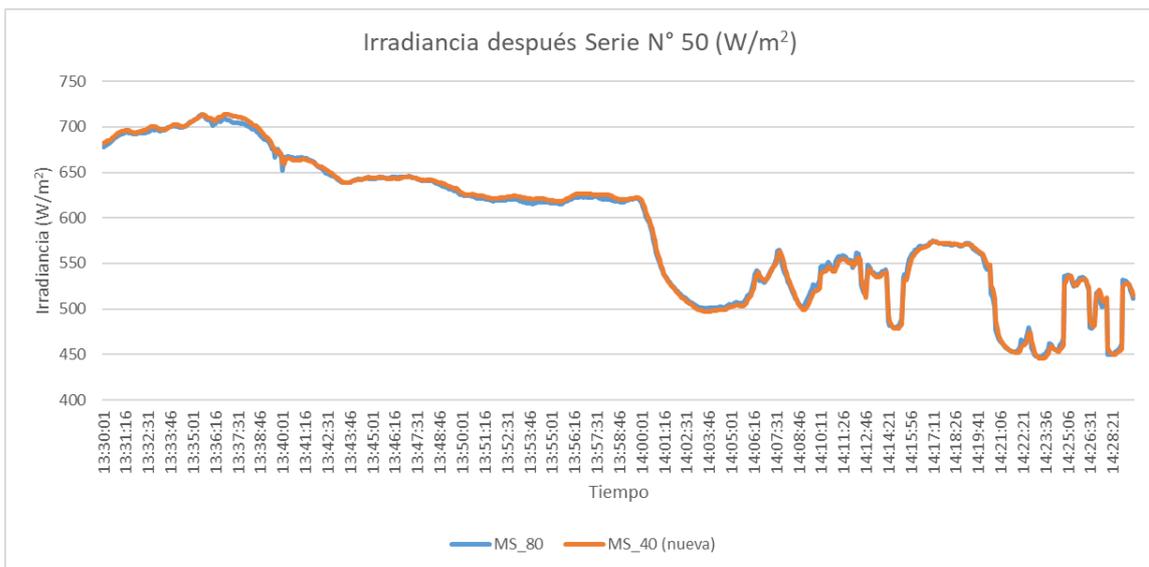
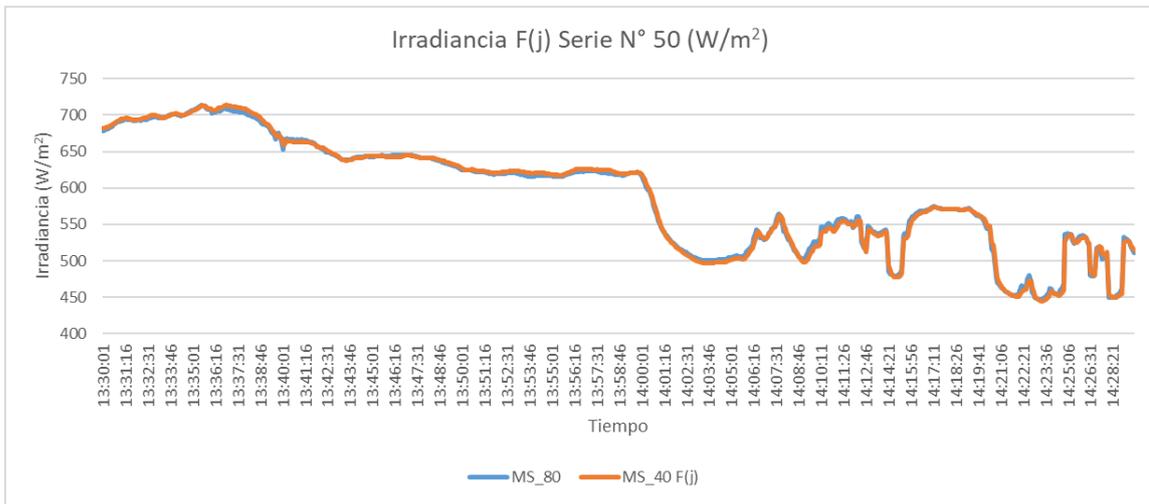
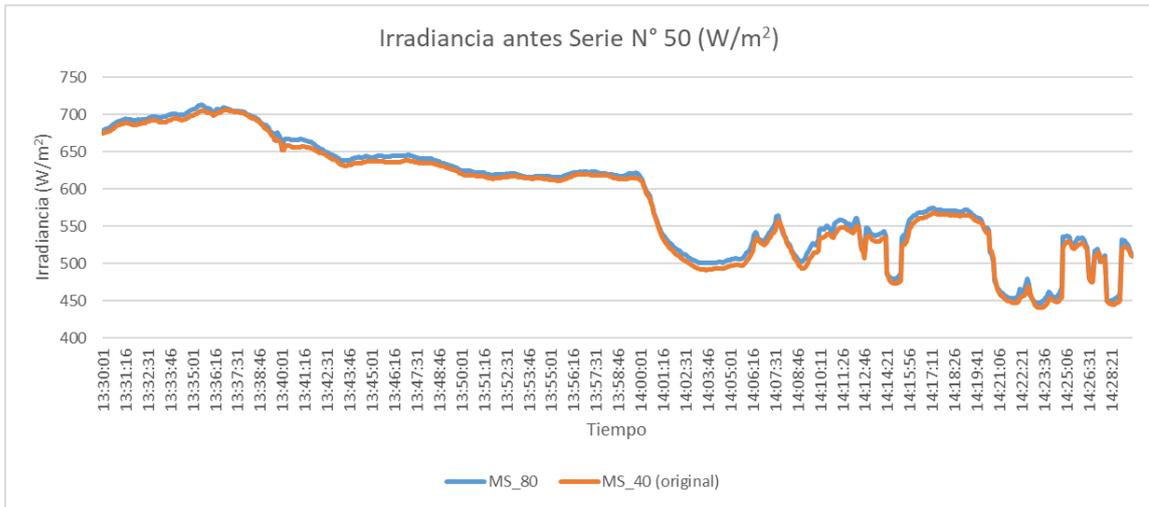


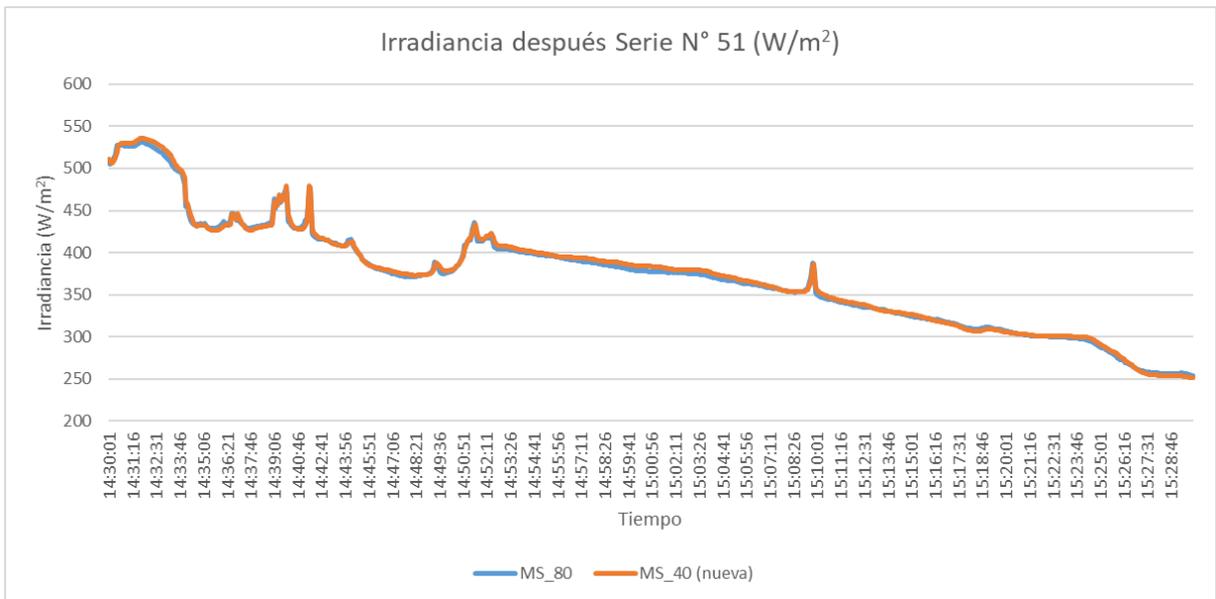
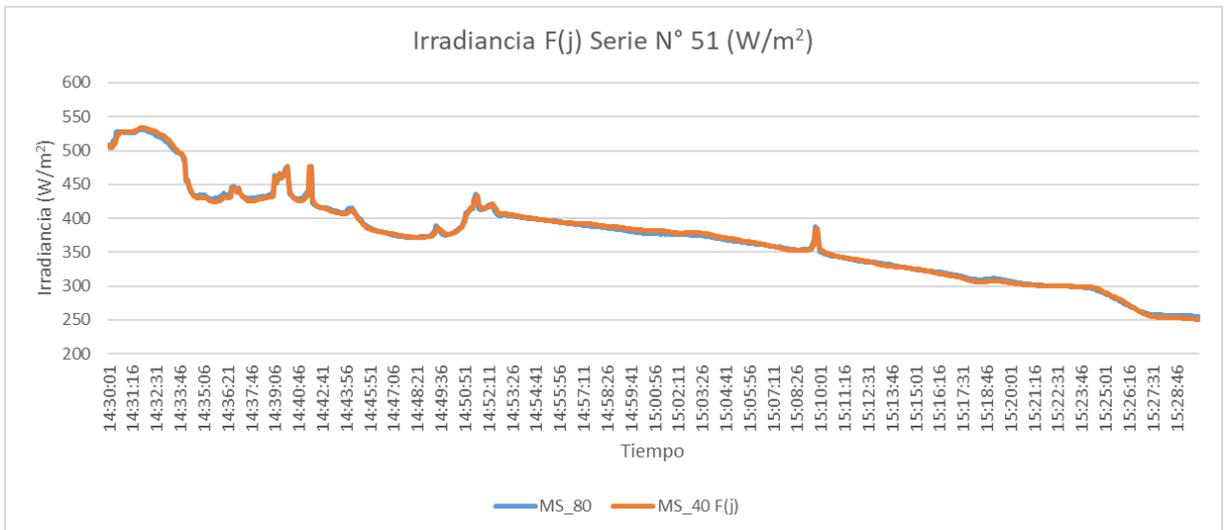
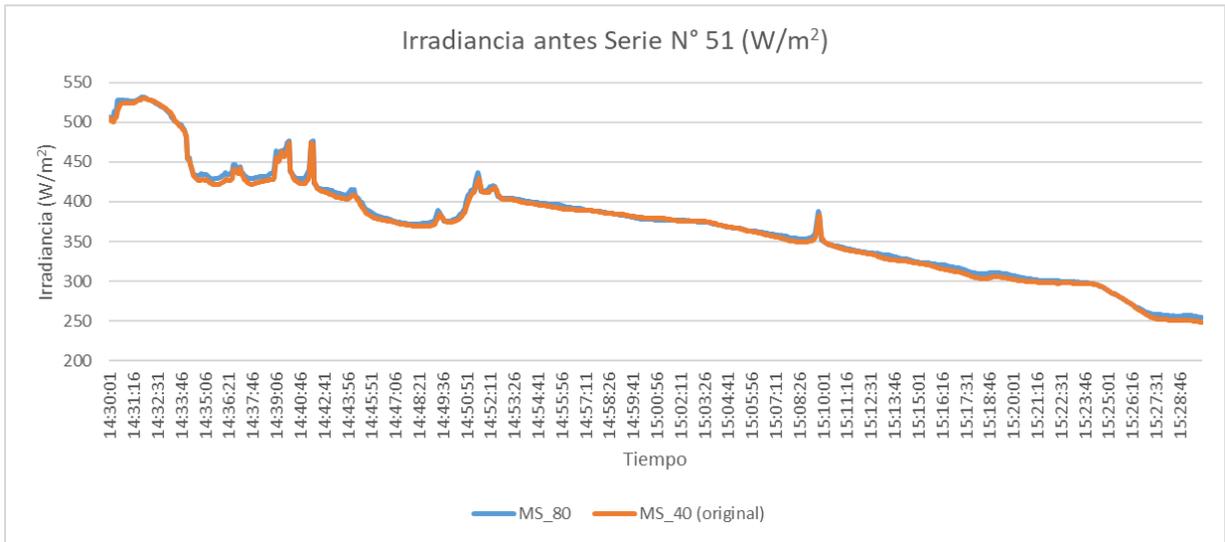




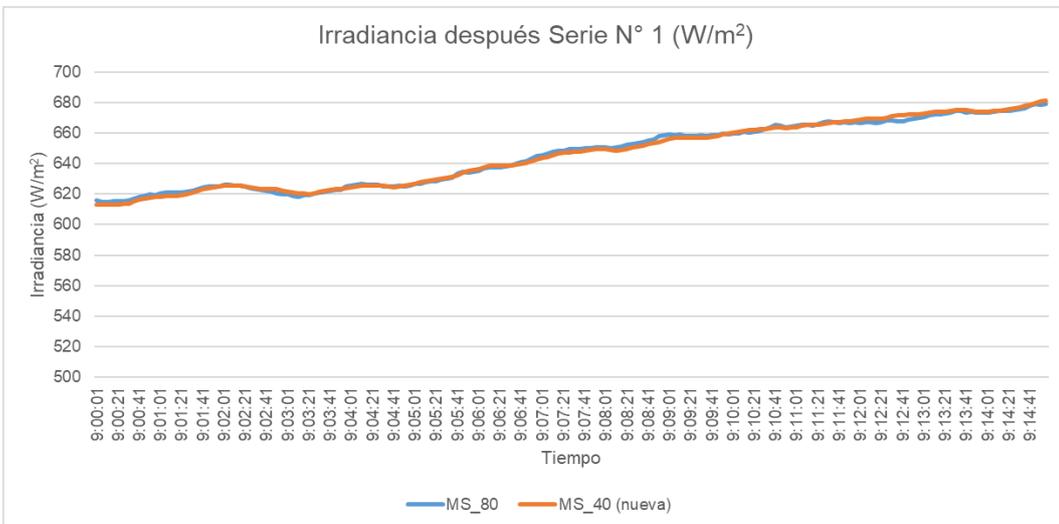
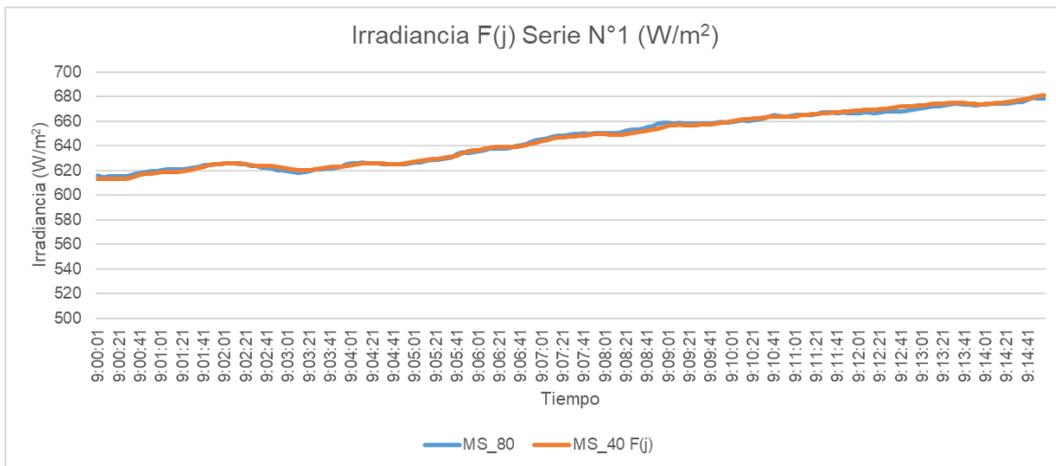
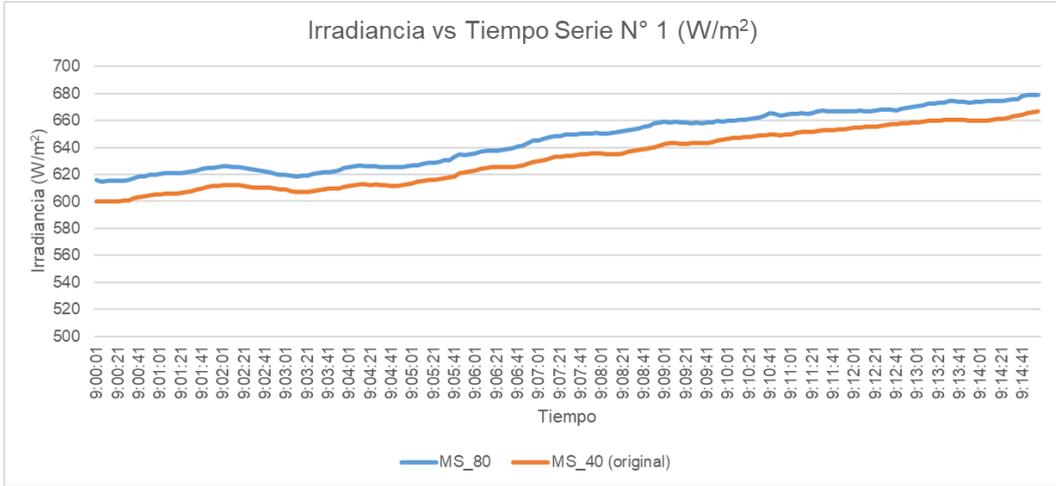


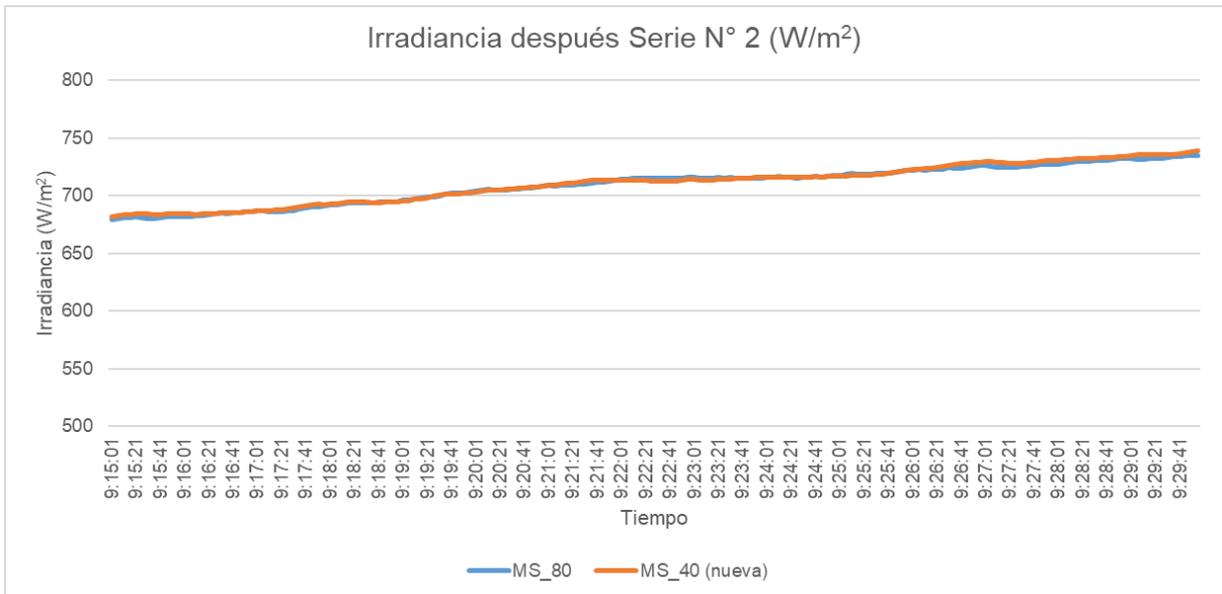
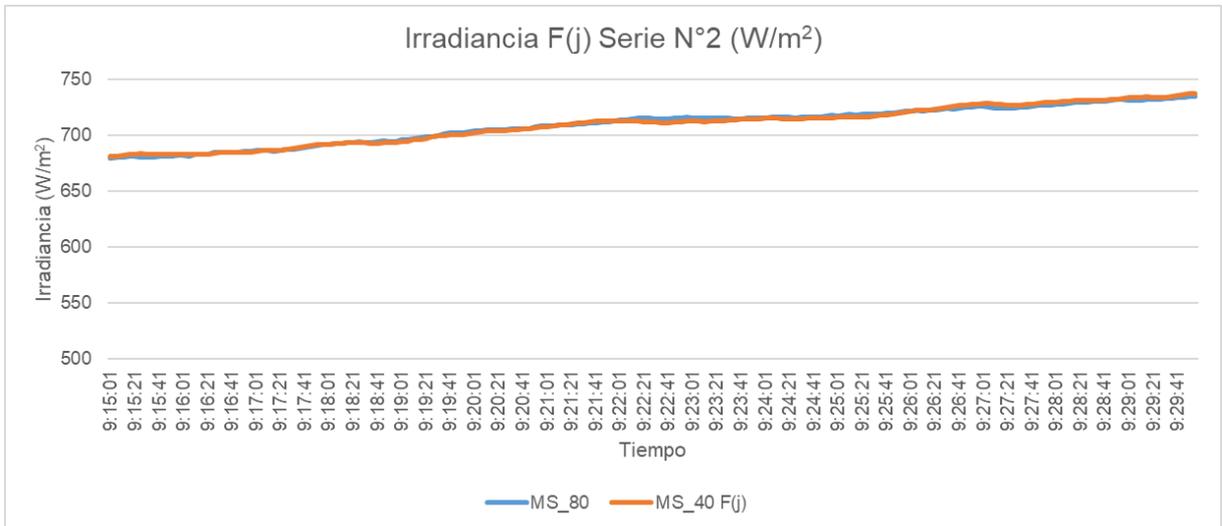
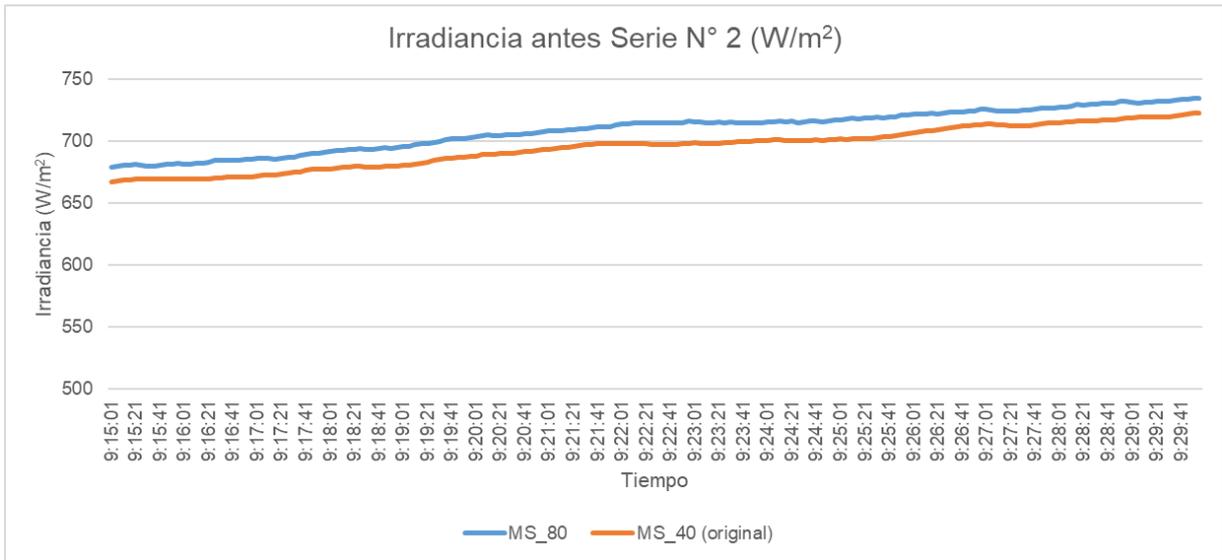


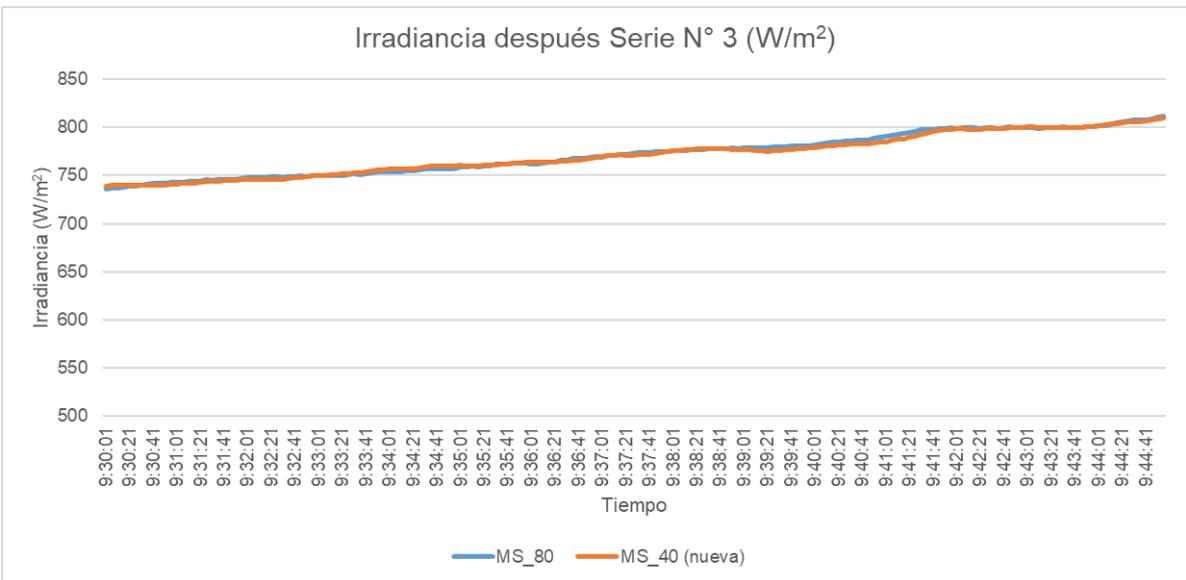
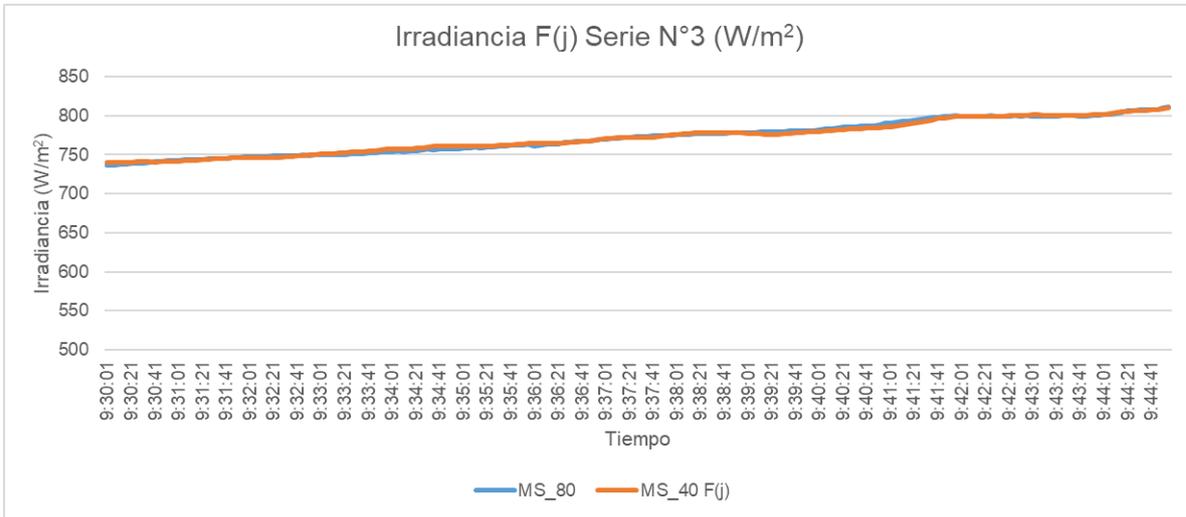
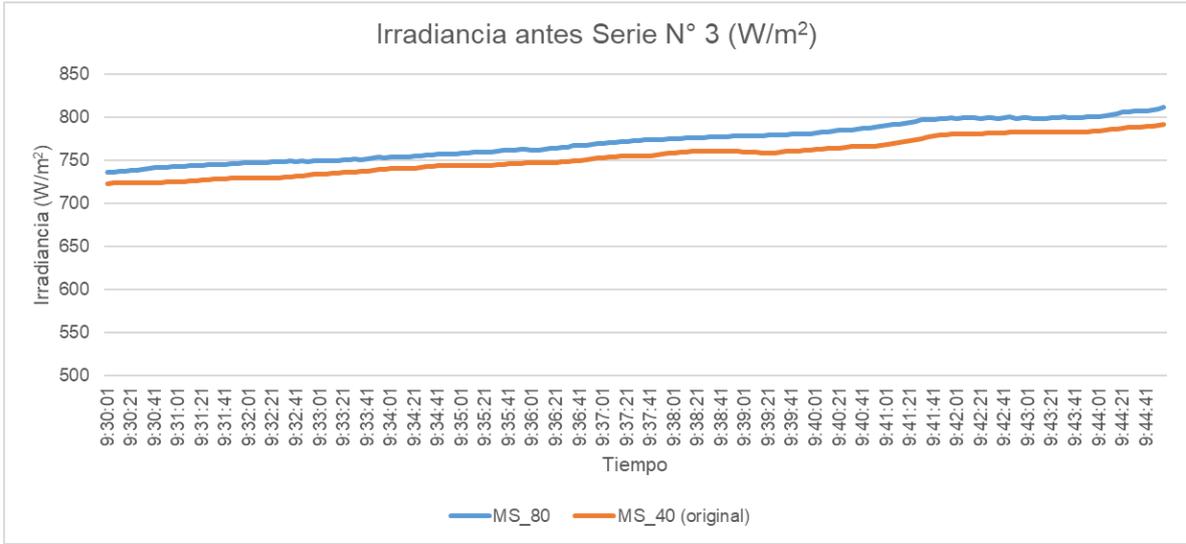


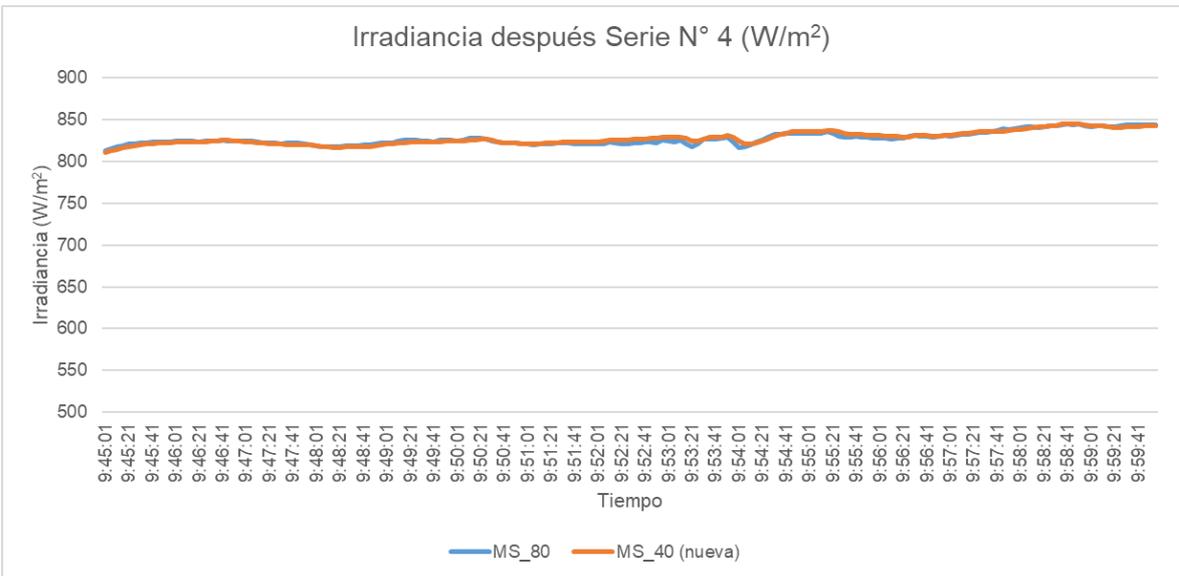
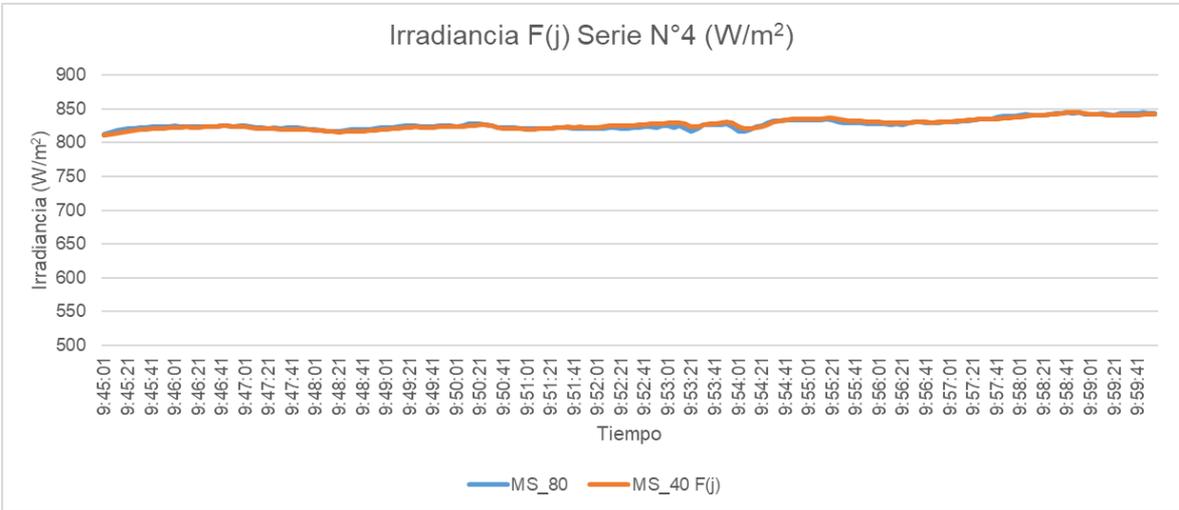
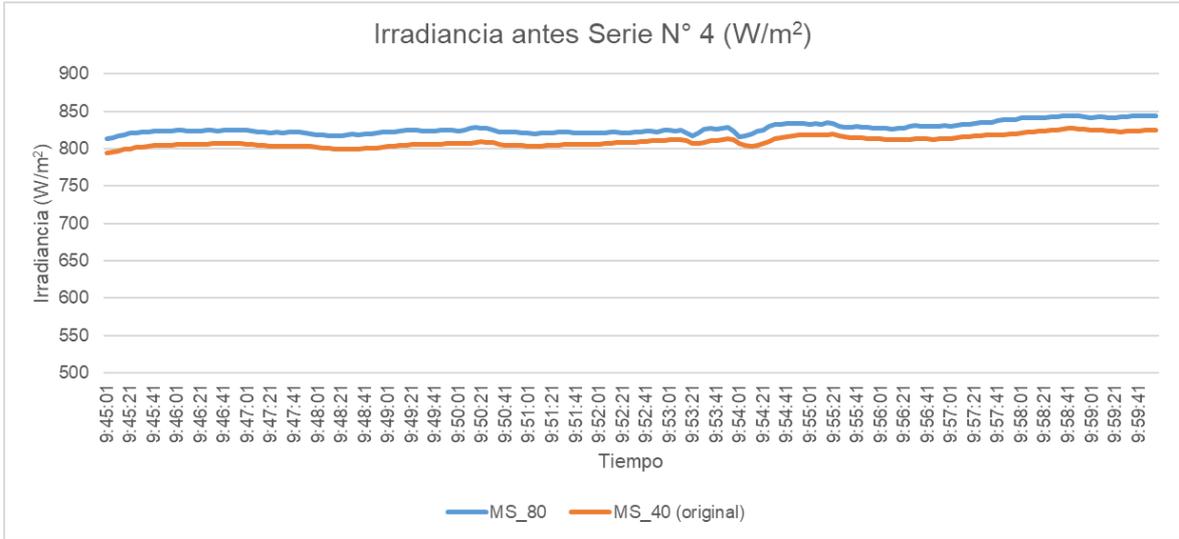


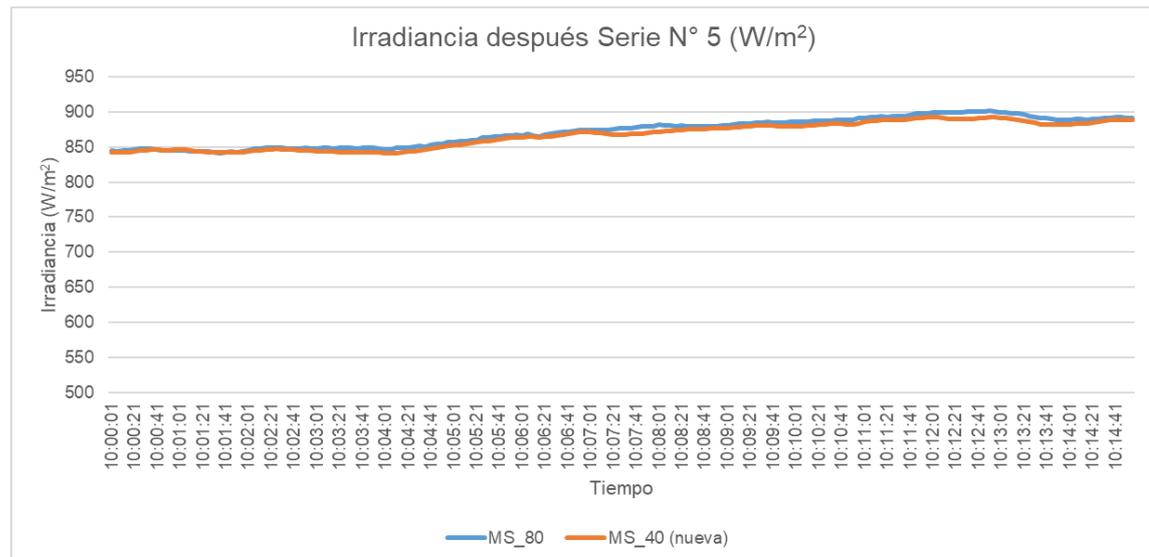
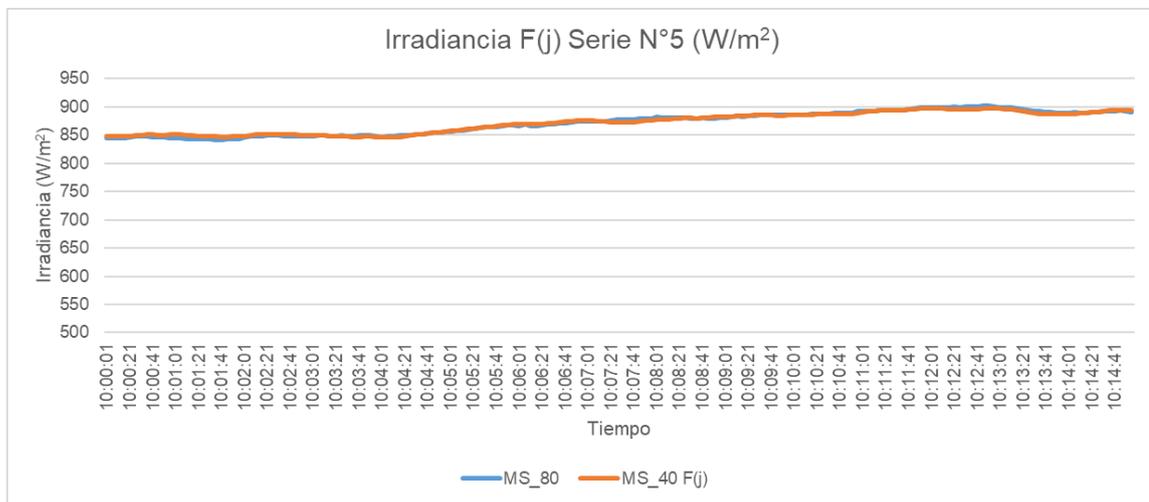
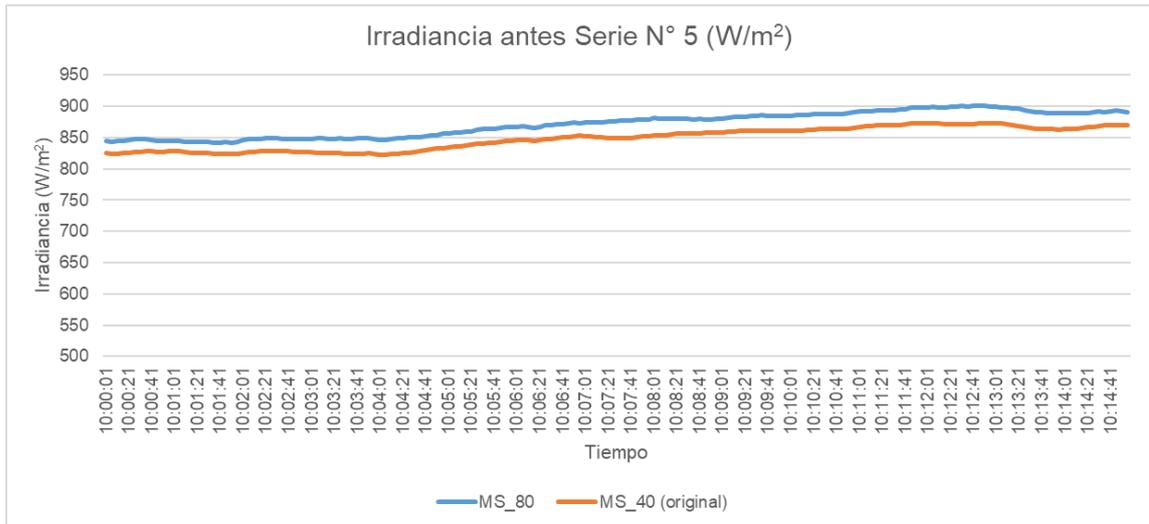
- **GRÁFICAS EN CONDICIONES DE CIELO SIN NUBES Y ESTABLE**

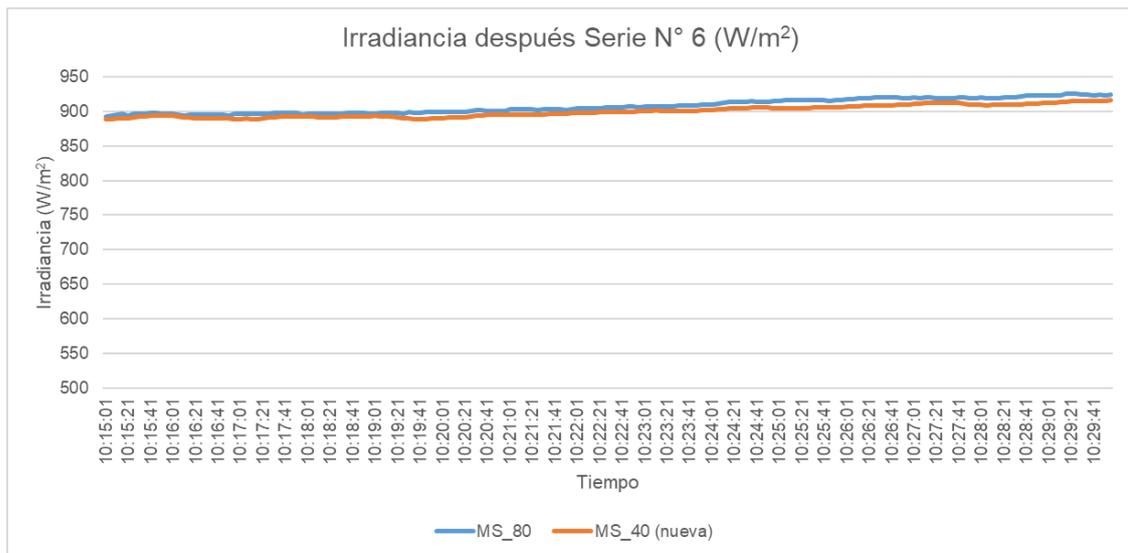
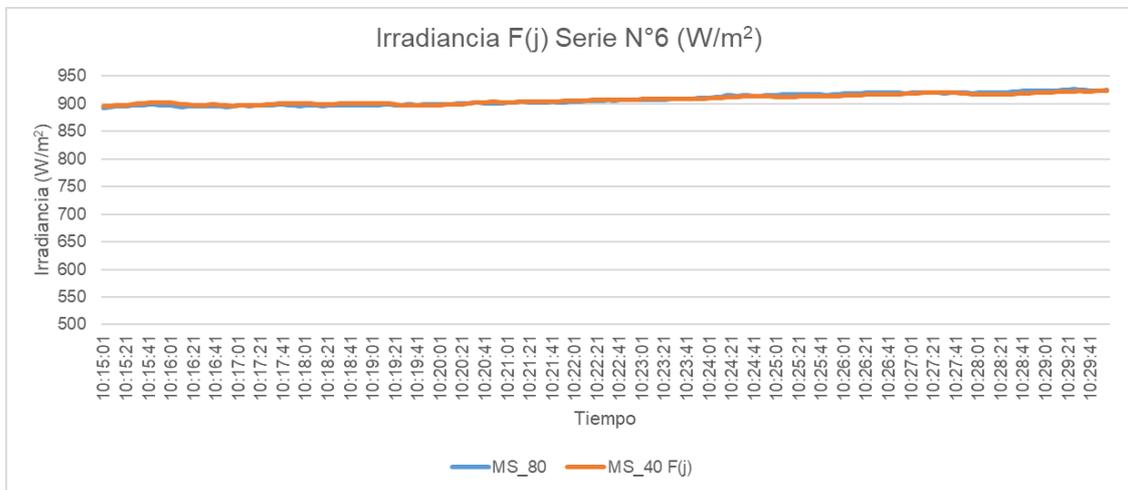
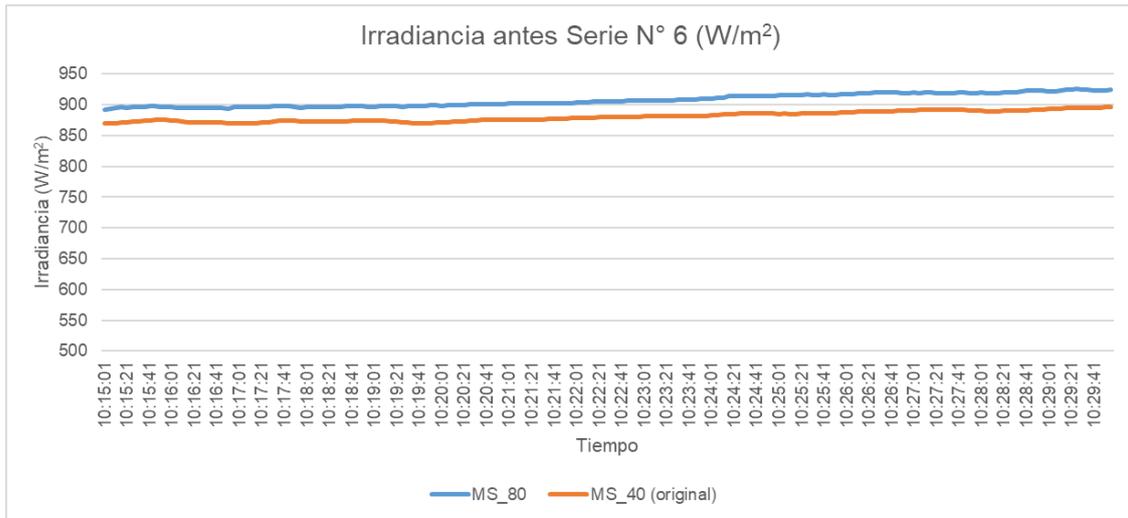


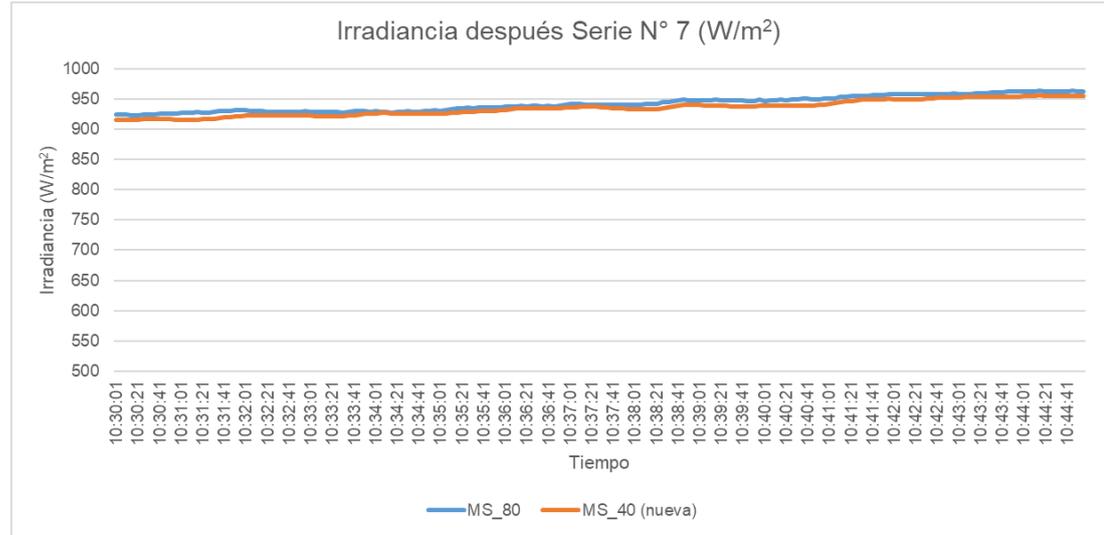
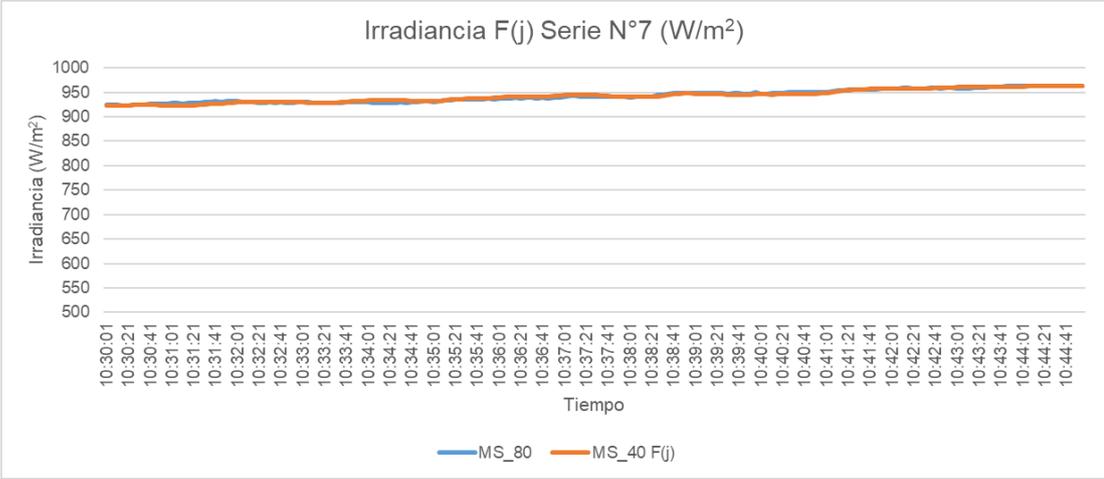
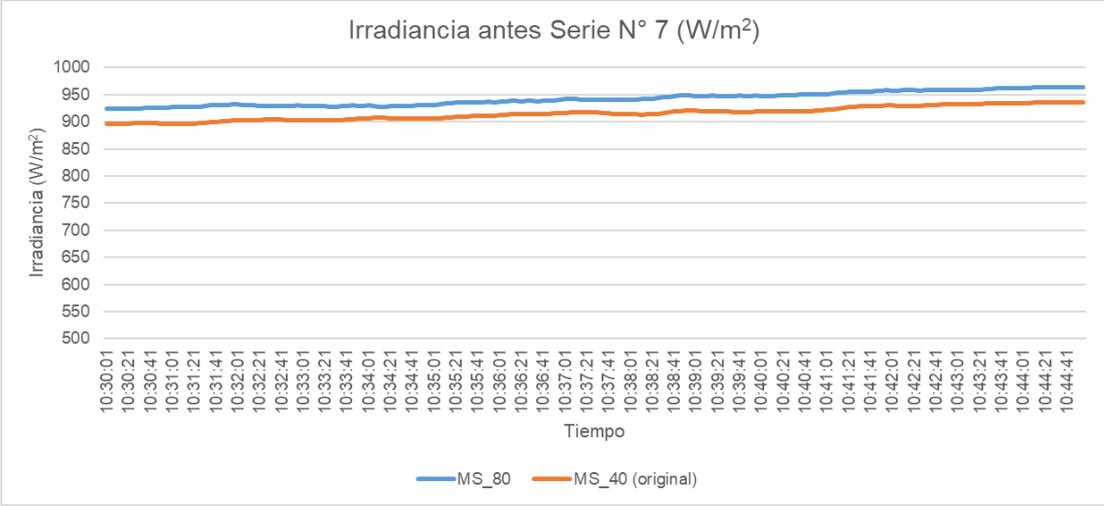


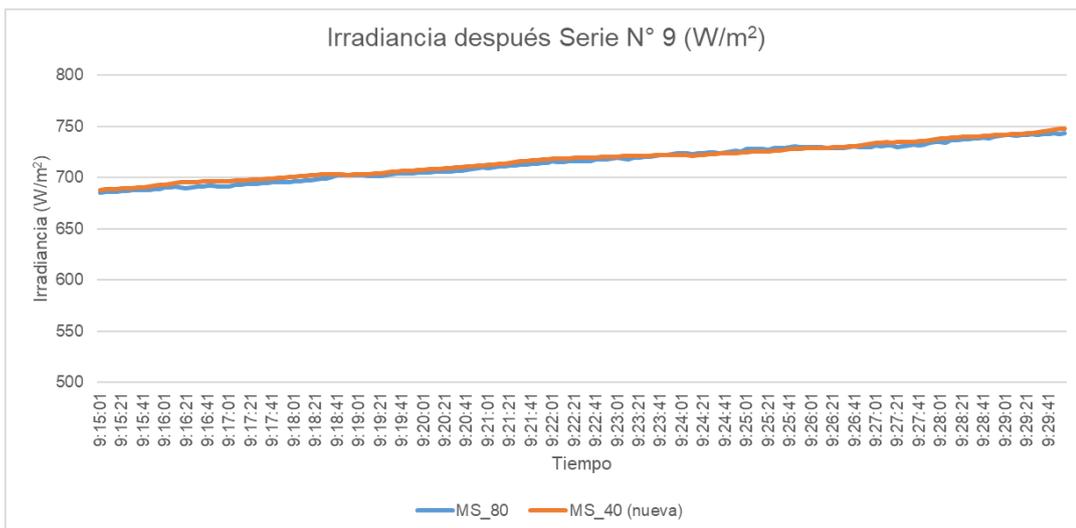
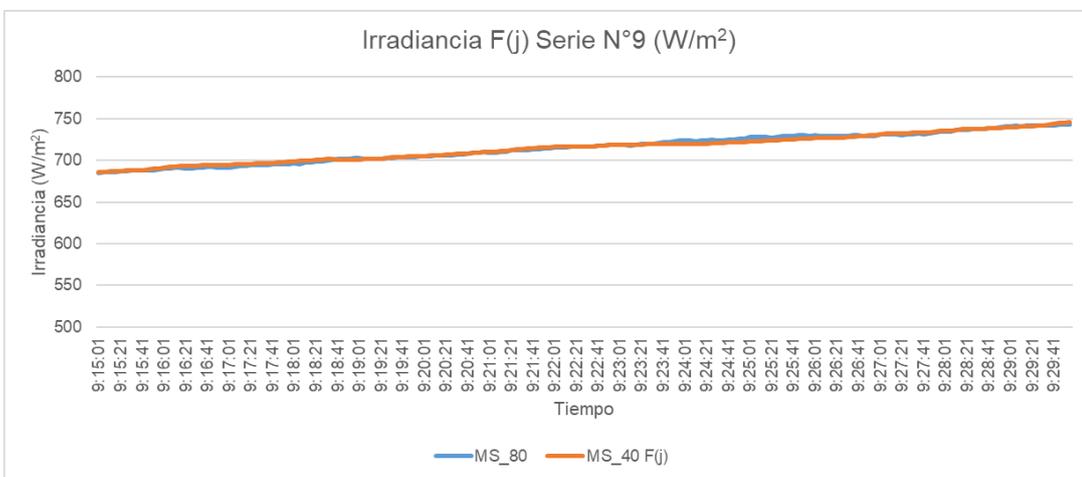
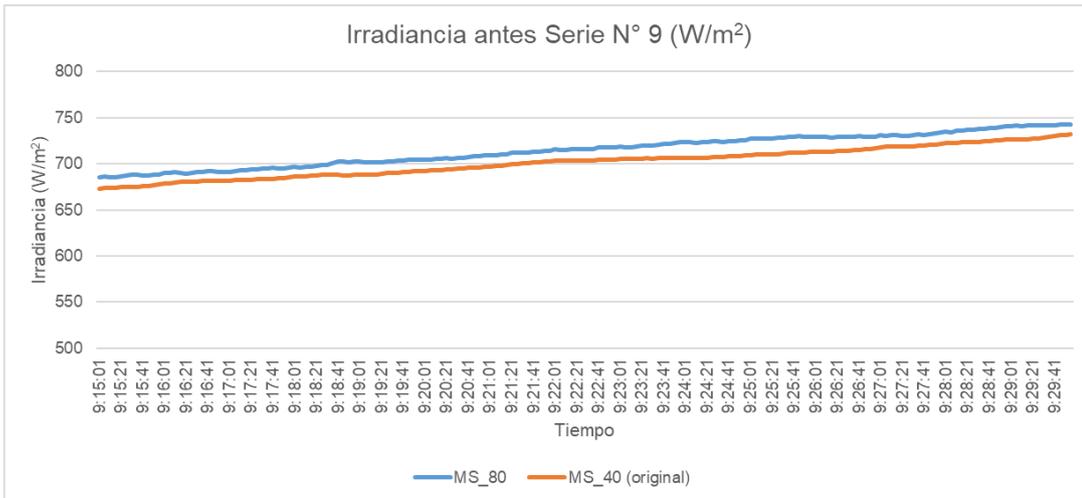


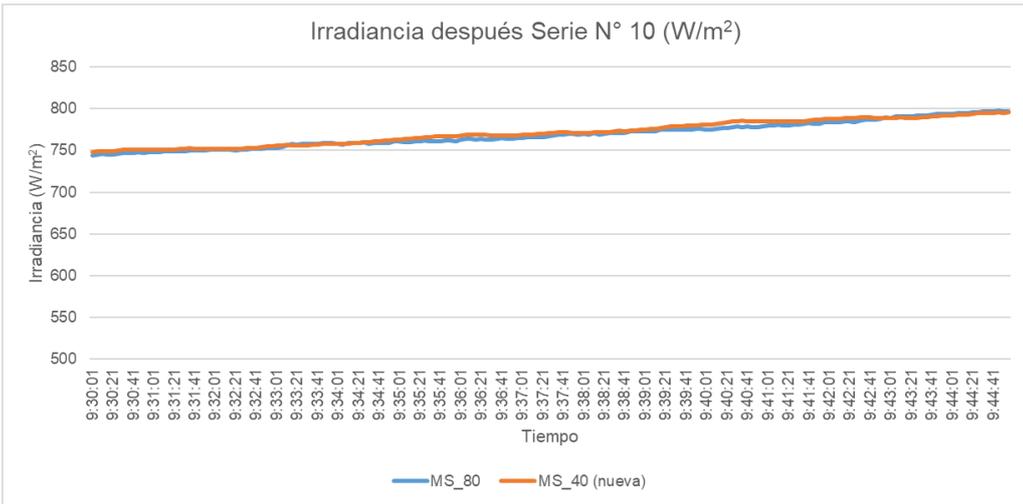
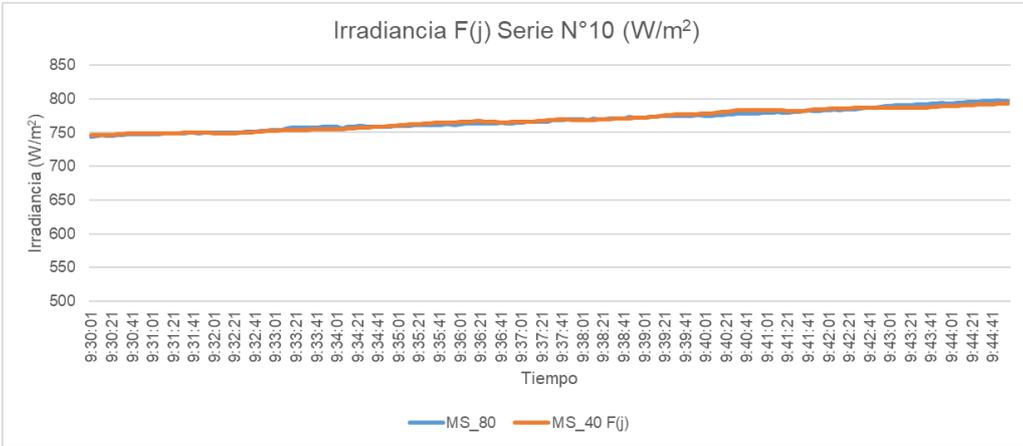
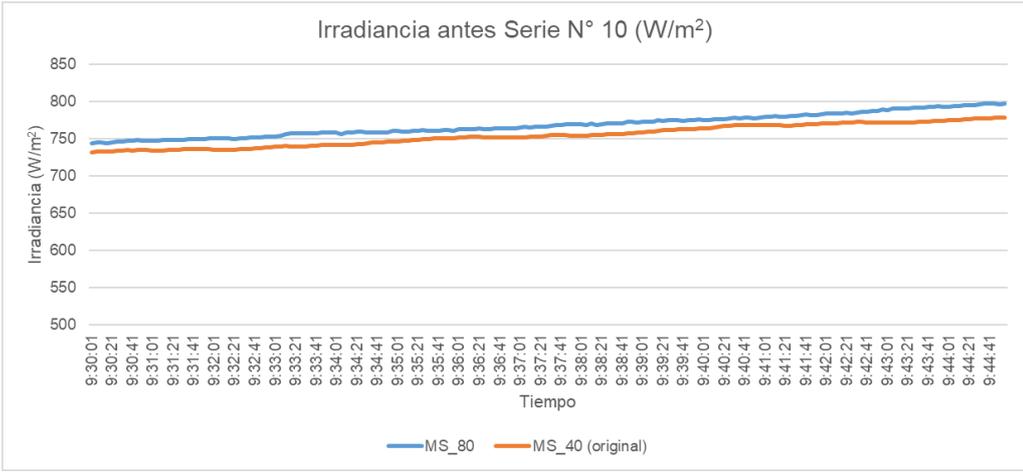


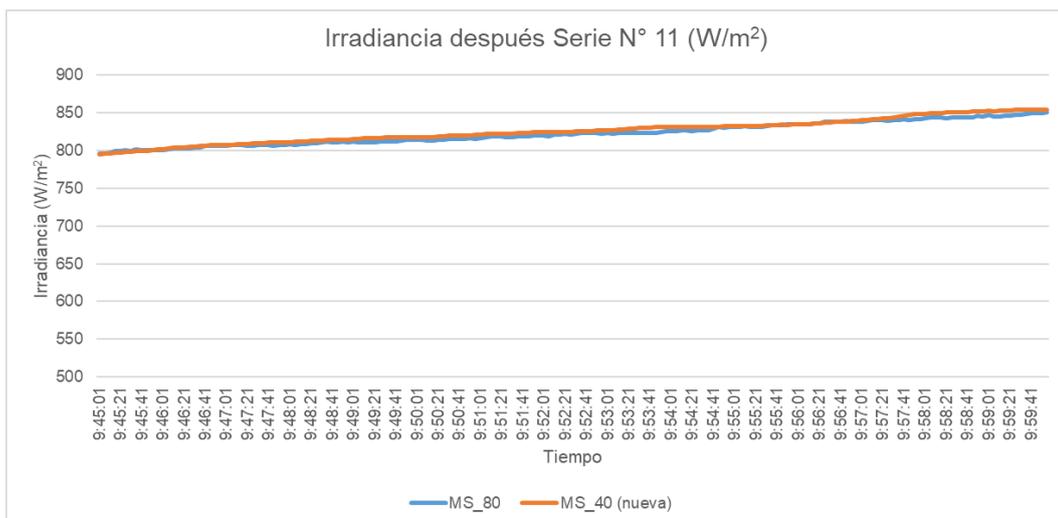
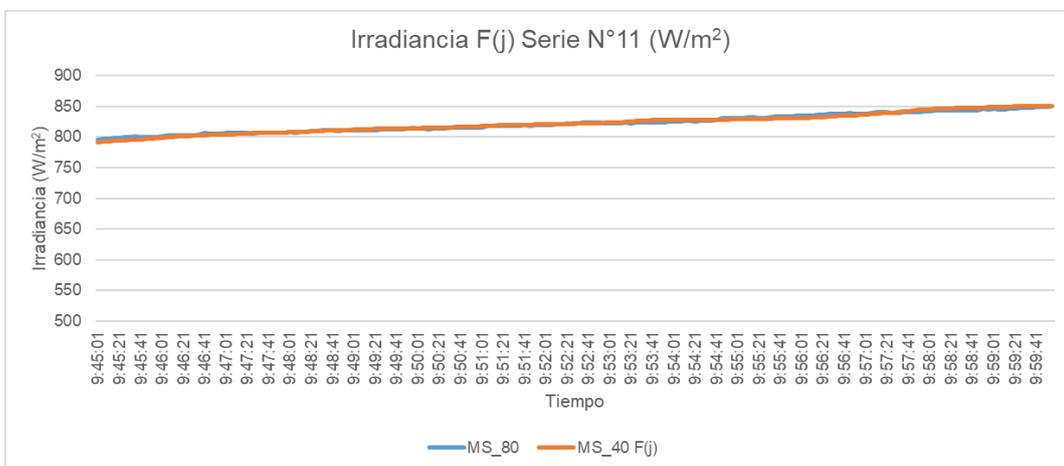
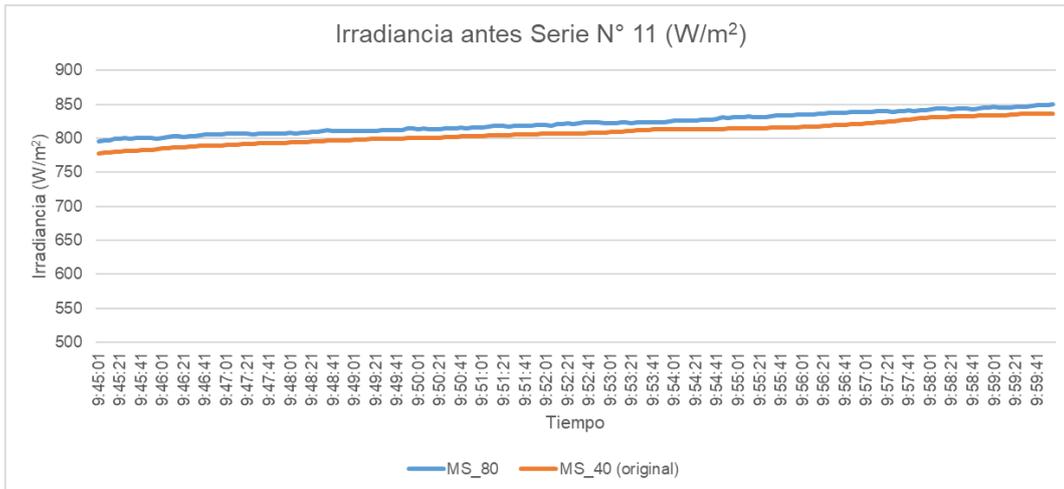


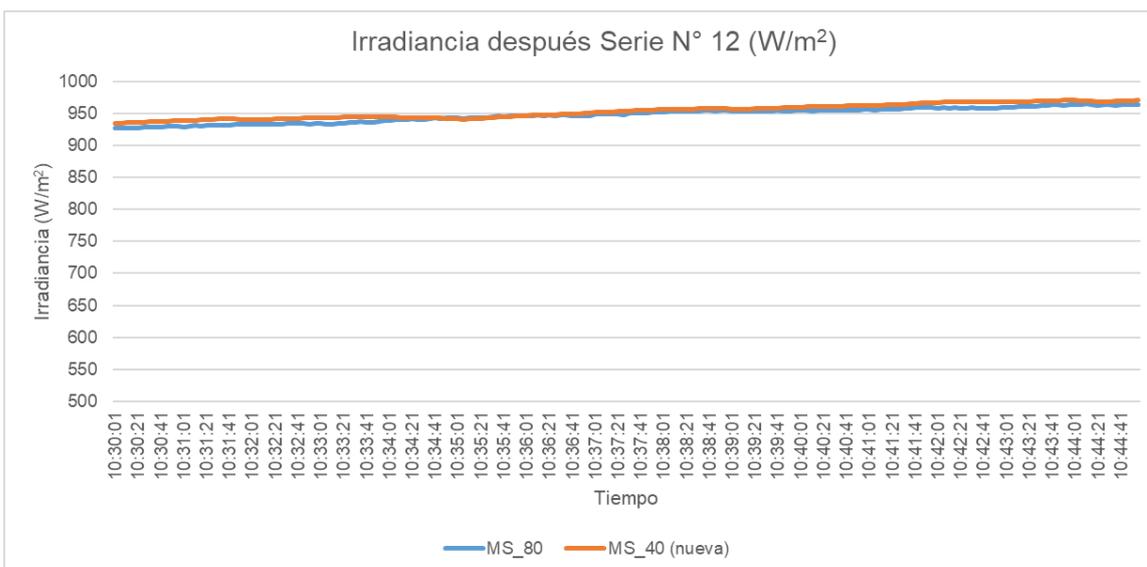
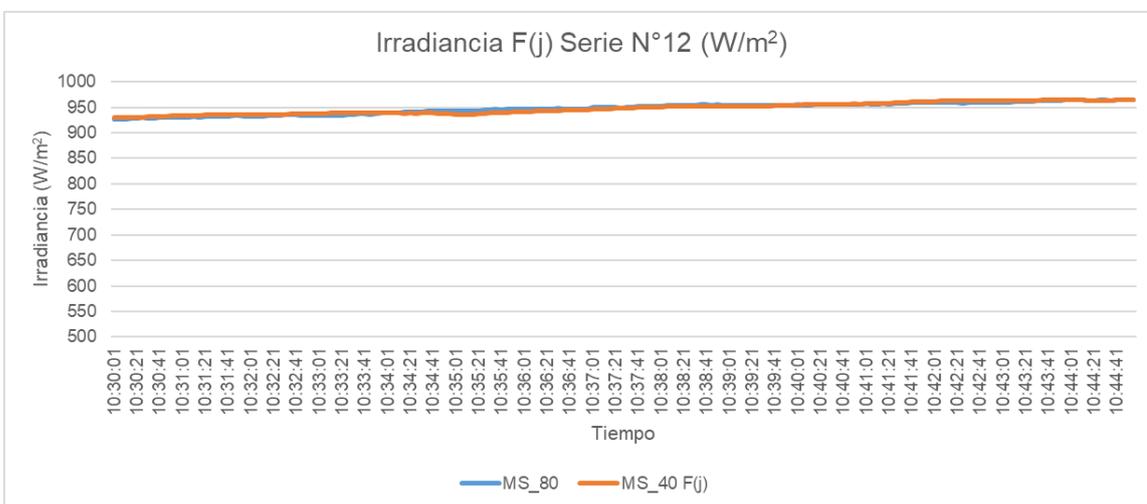
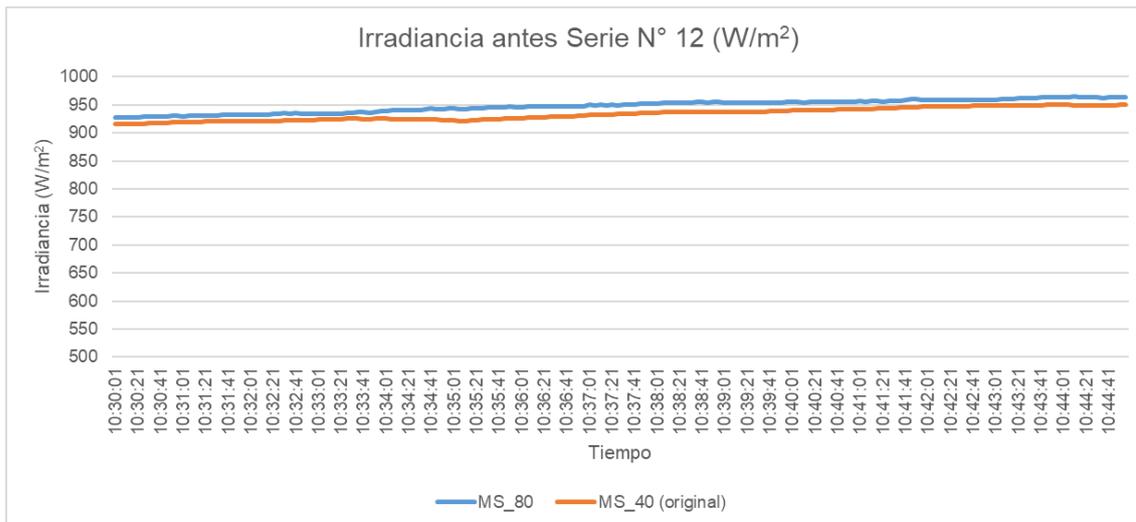


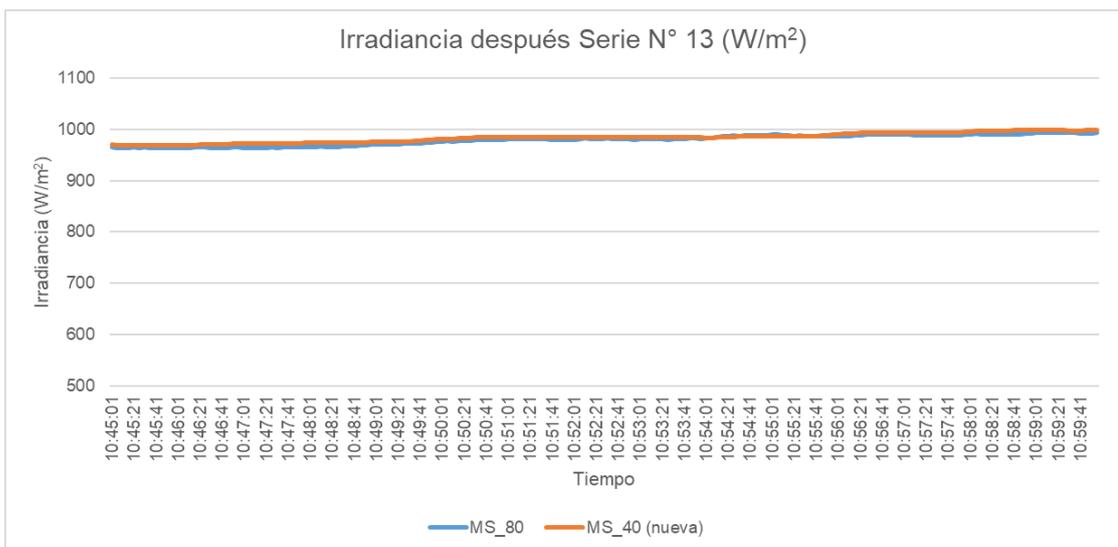
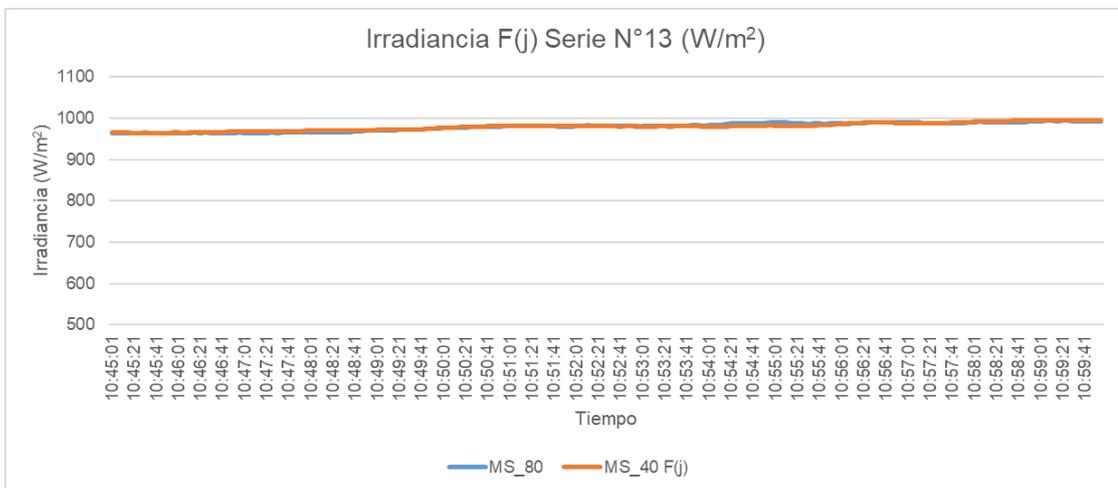
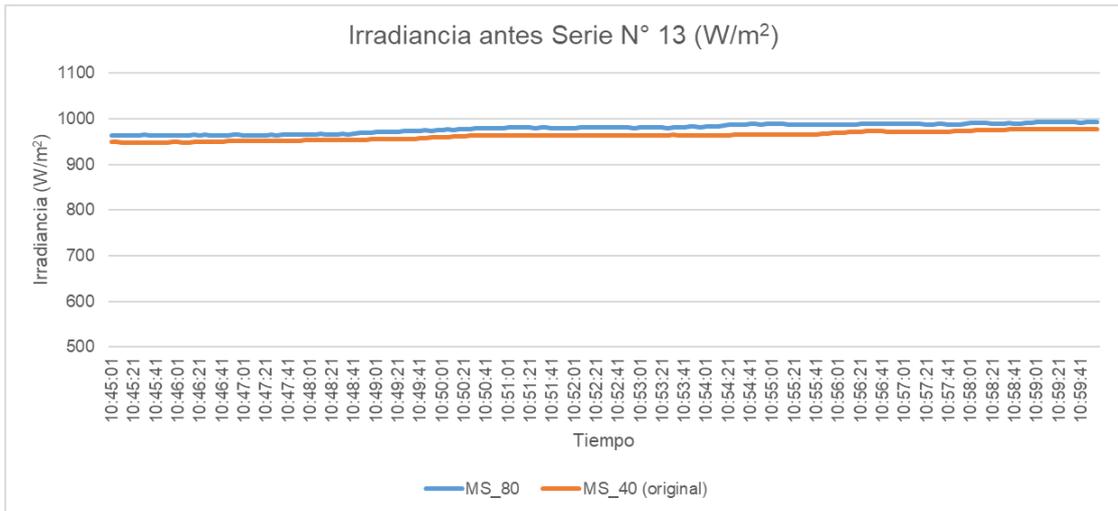


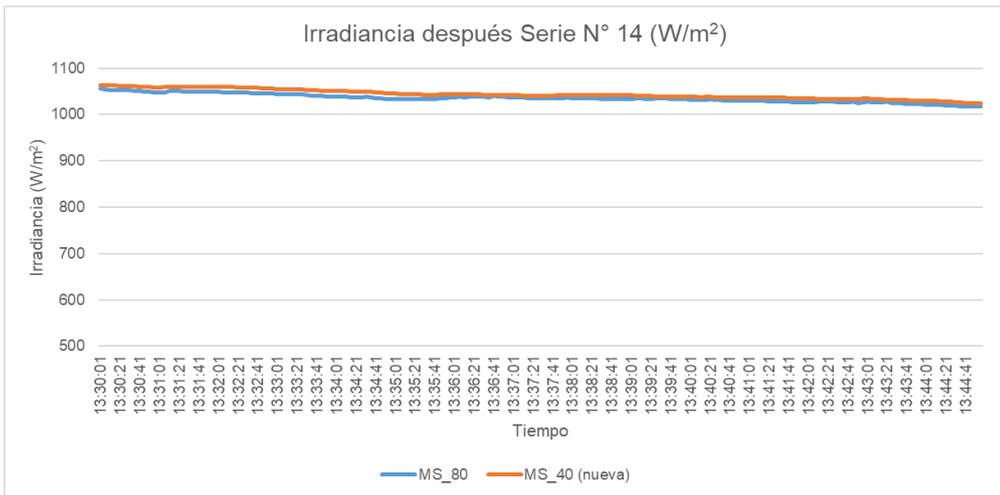
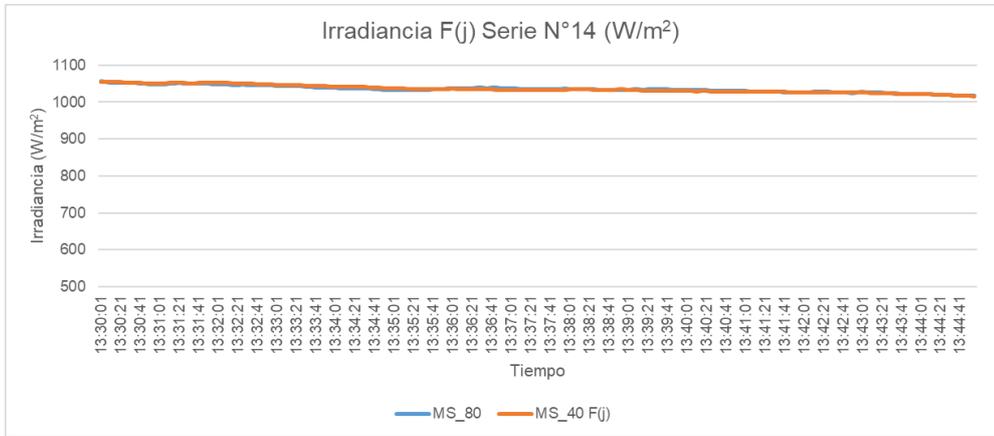
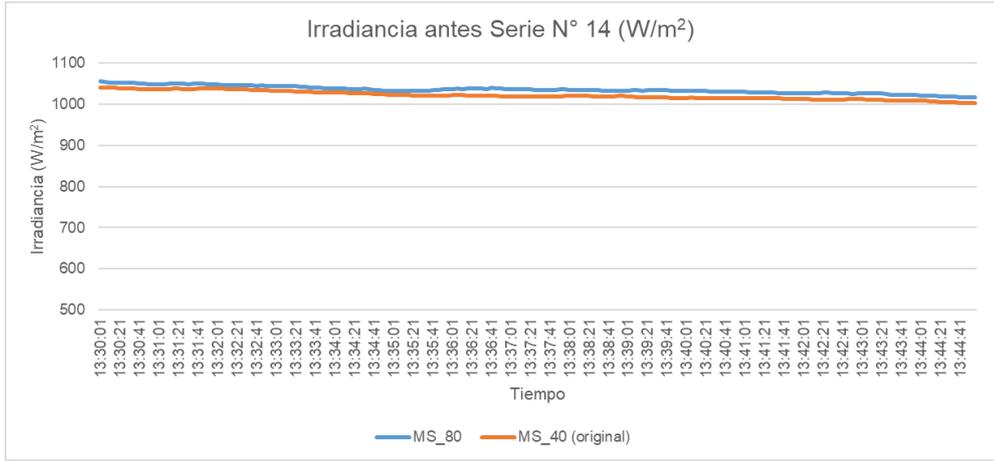


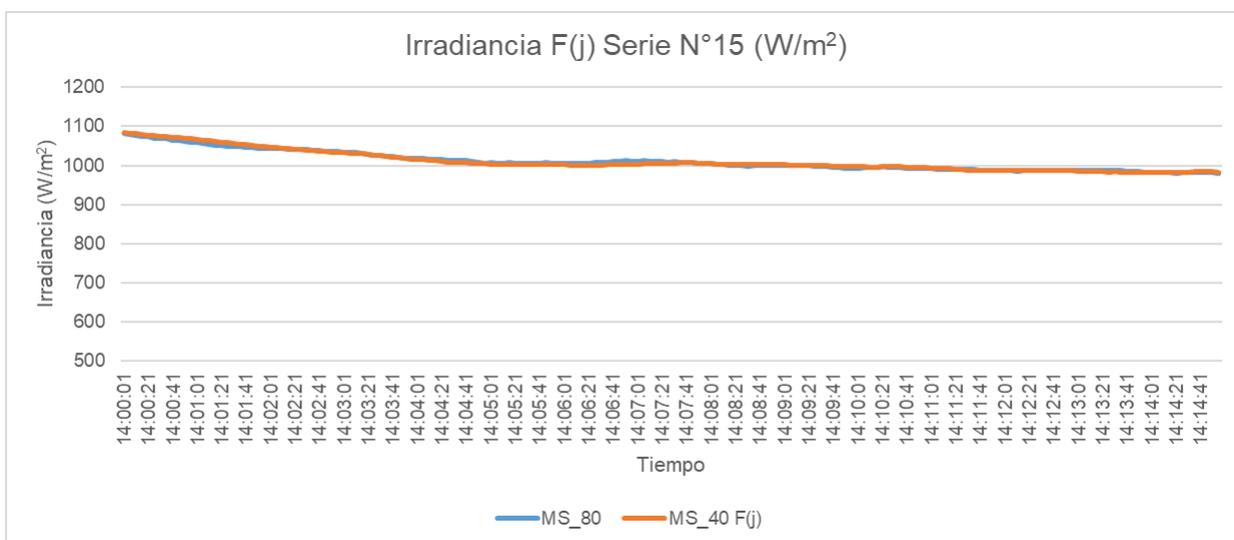
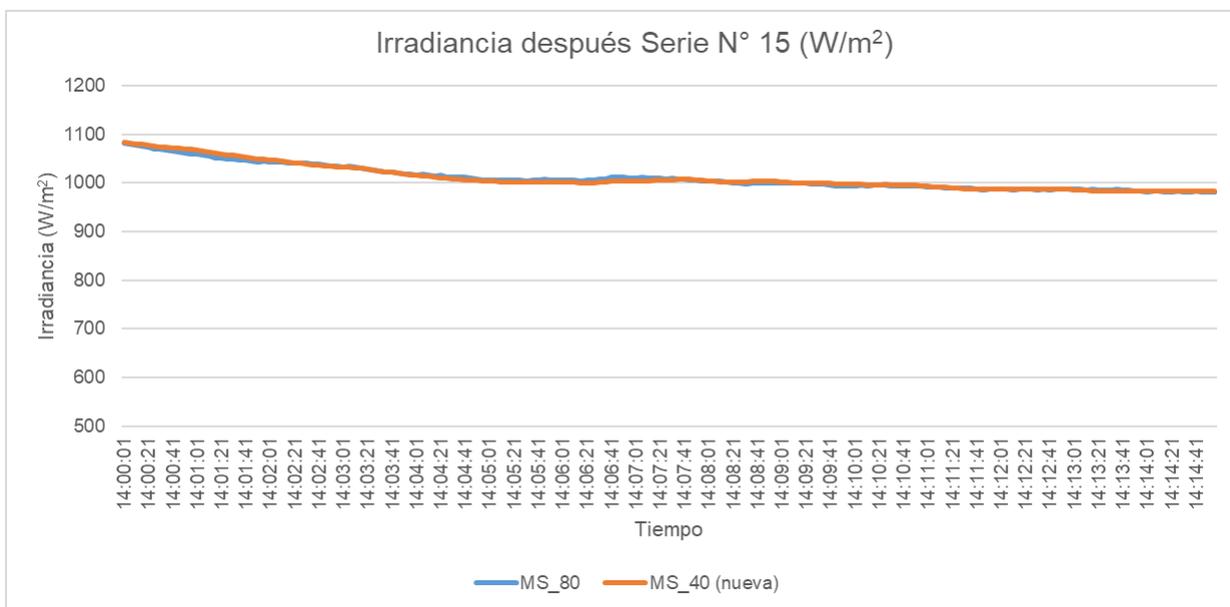
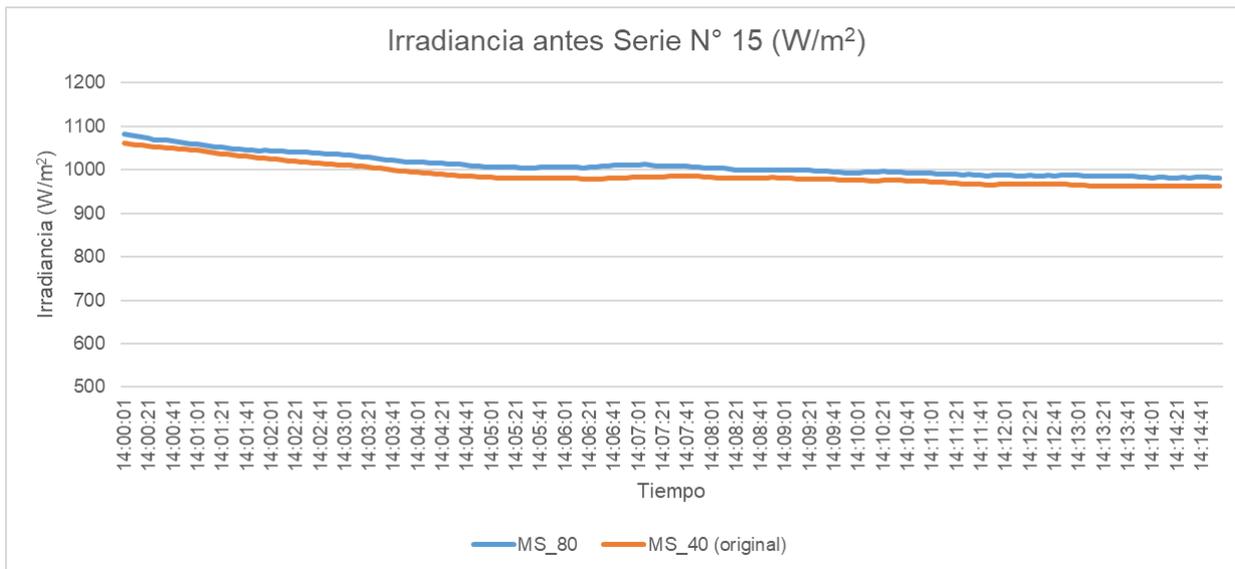












- [ENLACE DE TODOS LOS CÁLCULOS REALIZADOS EN LOS PROCESOS DE CALIBRACIÓN](#)

## ANEXO II. EJEMPLO CALIBRACIÓN

En este anexo se presenta a mayor detalle los pasos descritos en el Manual de calibración.

### • **INSTALACIÓN DE EQUIPOS PARA SU INSTALACIÓN**

Los equipos que se utilizaron para realizar el proceso de calibración son; un piranómetro de referencia EKO MS 80 (Clase A), un piranómetro de prueba EKO MS 40 (Clase C) y un Data Logger (FieldLogger Novus). Se conoce de ante mano, que los piranómetros son del mismo tipo, es decir son “termoeléctricos” y fueron calibrados de fábrica con el método tipo IIc según la norma ISO/IEC 9847.

Antes de realizar el procedimiento de calibración, la norma sugiere conocer la compatibilidad de los piranómetros con el data logger. Por lo tanto, se verificó las características de la lectura de los instrumentos y la resolución del data logger, tomando en cuenta la precisión en la lectura de la señal eléctrica. De ante mano, se conoce que los instrumentos mandan una señal eléctrica de voltaje en un rango de (0 a 20 mV), que son compatibles con las entradas analógicas que posee el FieldLogger Novus. Además, estas entradas tienen una resolución de conversión A/D de 24 bits, que es capaz de leer y capturar señales muy pequeñas como la de los piranómetros.

Después de comprobar la compatibilidad de los equipos, se procede a realizar la instalación para el proceso de calibración, esquematizo en los siguientes pasos.

#### ➤ **Paso 1: Verificar el entorno del proceso de calibración.**

El lugar que se escogió para realizar el proceso de calibración es la estación meteorológica del grupo de investigación Scinergy, ubicada en la terraza del edificio de Química y Electrónica de la EPN. Este lugar es de acceso restringido, es decir, no existe interferencia de terceros que pongan en riesgo el proceso de calibración. Además, la mesa de calibración se ubicó en una posición estratégica donde no exista objetos que provoquen sombra.

#### ➤ **Paso 2: Colocar los piranómetros en la mesa de calibración.**

En la Figura 5.1, se observa la instalación de los piranómetros en la mesa de calibración común. Estos instrumentos deben estar correctamente nivelados y orientados hacia el ecuador o a cualquier polo cercano como sugiere la norma.



**Figura 5.1.** Instalación de piranómetros en la mesa calibración común, al aire libre (Ejemplo)

➤ **Paso 3: Revisar la polaridad de señal de los piranómetros, continuidad eléctrica de los cables, la intensidad y estabilidad de señal.**

Para conocer la polaridad de señal de los piranómetros, se recurre al manual de usuario de cada instrumento. Sabiendo esto, para el piranómetro de referencia MS 80, el cable de color marrón es el positivo (+) y el de color blanco el negativo (-). Por otro lado, para el piranómetro de prueba MS 40, el cable de color blanco es el positivo (+) y el de color negro el negativo (-), tal como se observa en las Figuras 5.2 y 5.3.

No.	Cable Color		MS-80
	MS-80	MS-80U	
1.	Brown	Red	mV [+]
2.	White	White	mV [-]

**Figura 5.2.** Polaridad del piranómetro MS 80 (Ejemplo)

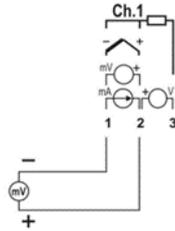
No.	Cable Color	MS-40
1.	White	mV [+]
2.	Black	mV [-]

**Figura 5.3.** Polaridad del piranómetro MS 40 (Ejemplo)

Por otro lado, para conocer la intensidad de señal en los cables de los piranómetros, se recomienda usar un multímetro en la opción de lectura de voltaje. De igual forma, se utiliza el mismo instrumento para verificar la continuidad eléctrica de los cables, y así descartar si un cable de señal se encuentra roto o dañado.

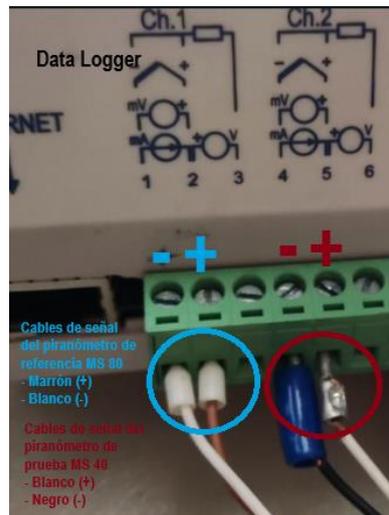
➤ **Paso 4: Conectar los cables de señal a las entradas del Data Logger.**

El manual de usuario del data logger especifica que la entrada número uno es la positiva (+) y la entrada número dos la negativa (-), tal como se observa en la Figura 5.4.



**Figura 5.4.** Polaridad de las entradas analógicas del Data Logger Novus (Ejemplo)

Conociendo la polaridad de señal del dispositivo, se procede a conectar los cables de los piranómetros a las entradas del data logger, como en la Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Conexión de cables de señal al Data Logger (Ejemplo)

➤ **Paso 5: Realizar la configuración para el registro de datos en el software del Data Logger, según la Figura 4.1 del manual de calibración.**

En los siguientes puntos se describen las etapas de configuración del data logger.

- **Crear un archivo registrador**

Para comenzar, en el software del data logger llamado “Configuración FieldLogger Novus”, se crea un nuevo archivo de configuración con el nombre de la tarea a desarrollar.



**Figura 5.6.** Nuevo archivo de configuración (Ejemplo)

- **Configurar las entradas de lectura de señal**

Luego, se configura los canales señal del data logger colocando: el nombre del sensor, tipo de señal del instrumento, el rango de medición, los decimales en la medida y la conversión de milivoltios (mV) a irradiancia ( $W/m^2$ ), como se observa en la Figura 5.7.



**Figura 5.7.** Configuración de canales analógicos (Ejemplo)

Para realizar la conversión de milivoltios a irradiancia, se accede al apartado de calibración customizada. En esta opción, se observan dos columnas, la primera

llamada “Valor padrón” y la segunda “Indicación del Field Logger”. En la columna de valor padrón, se ingresa los valores de los puntos iniciales y finales correspondiente a la irradiancia solar. Mientras que, en la columna de indicación del Field Logger, se ingresa los puntos iniciales y finales del rango de lectura del piranómetro en milivoltios.

Por ejemplo, el punto 1 del valor padrón corresponde al valor mínimo de irradiancia a 0 milivoltios, es decir 0 W/m<sup>2</sup>. Para el punto 2, se coloca el valor máximo de irradiancia a 20 milivoltios, que corresponde 1908,39 W/m<sup>2</sup>. Esta conversión de irradiancia se la realiza con la Ecuación 3.2 del manual, utilizando la sensibilidad del piranómetro de referencia (MS 80) de 10,48 (μV/W·m<sup>-2</sup>) o 95,42 (W/m<sup>2</sup>·mV).

#	Valor del Padrón	Indicación del FieldLogger
1	0.000000	0.000000
2	1908.396973	20.000000

**Figura 5.8.** Conversión de señal eléctrica de voltaje (mV) a irradiancia (W/m<sup>2</sup>) para el sensor MS 80 (Ejemplo)

De manera similar, se realiza la configuración para el piranómetro de prueba (MS 40), pero utilizando la sensibilidad correspondiente a este instrumento, la cual es 12,37 (μV/W·m<sup>-2</sup>) o 80,84 (W/m<sup>2</sup>·mV).

#	Valor del Padrón	Indicación del FieldLogger
1	0.000000	0.000000
2	1616.814819	20.000000

**Figura 5.9.** Conversión de señal eléctrica de voltaje(mV) a irradiancia (W/m<sup>2</sup>) para el sensor MS 40 (Ejemplo)

**Nota:** La conversión de milivoltios a irradiancia no es obligatoria, pero es recomendable para visualizar y descartar cualquier error de configuración.

### ▪ **Configurar el registro de las mediciones**

Después, se establece la configuración de la lectura y registro de las mediciones en intervalos de tiempo acorde a la tarea a realizar. En este caso, para obtener más de veintiuna lecturas instantáneas de medición, se configura el intervalo de registro para guardar datos cada 5 segundos, tal como se aprecia en la Figura 5.10.

**Figura 5.10.** Configuración para el registro de mediciones en los dos piranómetros (Ejemplo)

### ▪ **Enviar la nueva configuración al data logger**

Una vez terminada la configuración de registro, se envía la nueva configuración a la memoria interna del dispositivo.



**Figura 5.11.** Envío de la nueva configuración al Data Logger

### ▪ **Diagnóstico de configuración y lectura de datos**

Finalmente, en la Figura 5.12 se observa si existe algún problema con la configuración del dispositivo para corregirla. Por otro lado, en la sección de gráficos de la Figura 5.13, el dispositivo muestra en tiempo real la toma de datos de los piranómetros, donde se

puede observar un desajuste en la medida del piranómetro de prueba (MS 40) respecto a la medida de referencia del piranómetro patrón (MS 80).

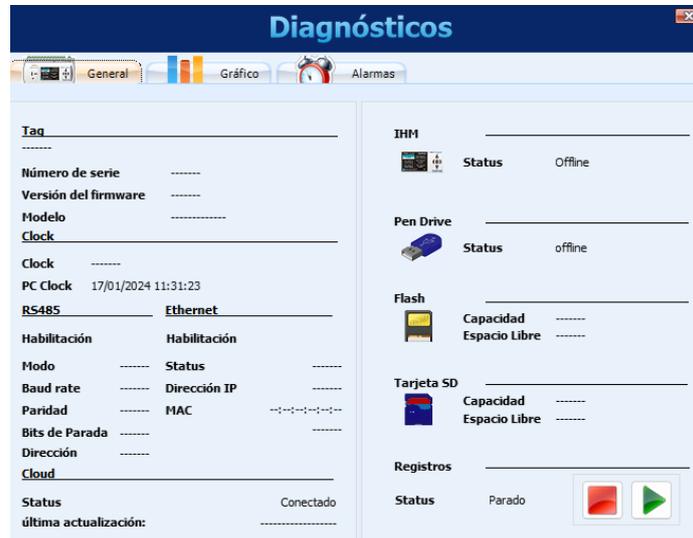


Figura 5.12. Configuración de diagnóstico general (Ejemplo)

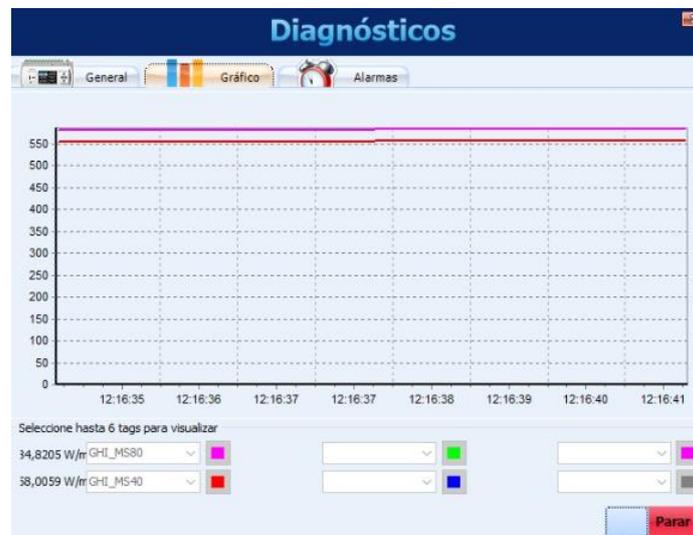


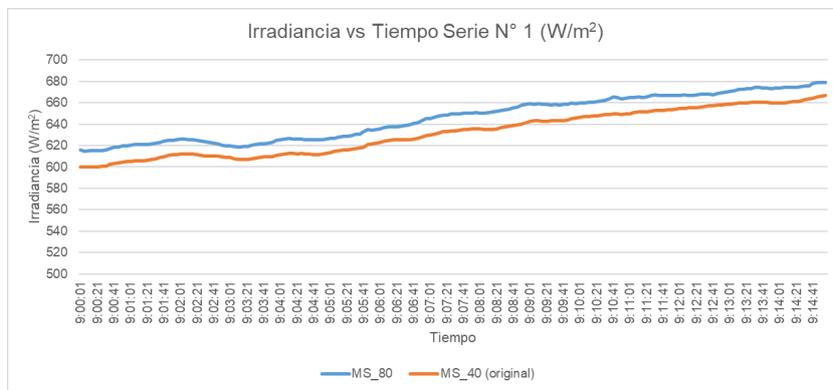
Figura 5.13. Diagnóstico de irradiancias respecto al tiempo (Ejemplo)

**Nota:** Esta última etapa de la configuración no es obligatoria, pero se la recomienda para observar cualquier novedad durante el proceso de recolección de datos.

➤ **Paso 6: Recolectar datos acorde a las condiciones de cielo.**

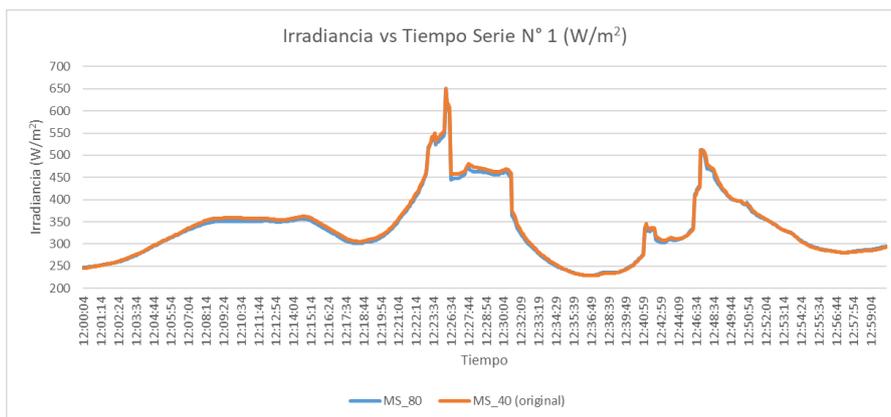
Para este ejemplo de calibración, se tomaron datos acorde a las condiciones de cielo sin nubes y estable, obteniendo 15 series de medición, con 180 lecturas de señal instantánea de voltaje en cada piranómetro, en un lapso de 15 minutos a lo largo de 3 días.

Una manera simple de verificar las condiciones de cielo sin nubes y estable, es analizar el comportamiento de la irradiancia respecto al tiempo en la serie de medición. Por ejemplo, en estas condiciones, la irradiancia solar no varía de manera brusca, tal como se observa en la Figura 5.14.



**Figura 5.14.** Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo sin nubes y estable (Ejemplo)

Por otro lado, en condiciones de cielo nublado e inestable la irradiancia varia formando picos por la presencia de nubes, tal como se puede apreciar en la Figura 5.15.



**Figura 5.15.** Irradiancia vs Tiempo (Serie N° 1) en condiciones de cielo con nubes e inestable (Ejemplo)

Como se mencionó anteriormente, el data logger crea un archivo csv con la siguiente información distribuida en columnas: fecha, hora e irradiancia solar instantánea de los dos piranómetros.

Con estos datos, se crea una tabla de distribución horaria en una hoja de cálculo de Excel, para observar el comportamiento de la irradiancia y así ordenarla por lapsos de tiempo establecido por las condiciones de cielo. Además, se convierte las mediciones instantáneas de irradiancia en señales instantáneas de voltaje para su posterior análisis en el tratamiento matemático. En la Figura 5.16, se muestra un ejemplo de la tabla de distribución horaria.

Fecha	time	GHI_MS80 (W/m2)	GHI_MS40 (W/m2)	MS80_GHI (mV)	MS40_GHI(mV)
6/1/2024	9:00:01	615,667	600,259	6,4521902	7,42520383
6/1/2024	9:00:06	614,7299	599,9462	6,4423694	7,421334494
6/1/2024	9:00:11	614,9835	599,7865	6,4450271	7,419359005
6/1/2024	9:00:16	615,3738	599,8586	6,4491174	7,420250882
6/1/2024	9:00:21	615,4229	600,1234	6,449632	7,423526458
6/1/2024	9:00:26	615,4283	600,3508	6,4496886	7,426339396

**Figura 5.16.** Tabla distribución horaria (Ejemplo)

- **TRATAMIENTO MATEMÁTICO**

De ante mano, el tratamiento especificado en la norma y en el manual de calibración sirve para cualquier condición de cielo. Además, está dividido en cuatro pasos que son complementarios con los seis pasos anteriores.

De manera de ejemplo de cálculo, se usó la primera serie de medición del segundo proceso de calibración en condiciones de cielo sin nubes y estable. Esta serie está conformada por 180 lecturas de señal instantáneas en cada piranómetro.

- **Paso 7: Encontrar los factores de calibración instantáneos  $F(ij)$  a partir de las señales instantáneas de los piranómetros.**

En la hoja de cálculo, se ordenan por columnas las 180 lecturas de señal de los piranómetros. Sabiendo que, el factor de calibración del piranómetro de referencia  $F_r$  es 95,419 (W/m<sup>2</sup>·mV).

Posteriormente, con la Ecuación 4.1 que se muestra a continuación, se calcula el factor de calibración instantáneo  $F(ij)$ .

$$F(ij) = \frac{V_r(ij)}{V_p(ij)} * F_r$$

**Ecuación 4.1.** Factor de calibración instantáneo

Donde, el  $V_r(ij)$  y  $V_p(ij)$  son las mediciones simultaneas de voltaje del piranómetro de referencia y de prueba respectivamente, tal como muestra en el siguiente ejemplo.

$$F(1,1) = \frac{V_r(1,1)}{V_p(1,1)} * F_r = \frac{6,452}{7,425} * 95,419 = 82,915 (W/m^2 * mV)$$

Obteniendo, el primer factor de calibración instantáneo  $F(1,1)$  igual a  $82,915 \left(\frac{W}{m^2 * mV}\right)$ .

Como hay que determinar 180 factores de calibración instantáneos en la primer serie, se emplea una hoja de cálculo de Excel, tal como se observa en la Figura 5.17.

Vr(i1)	Vp(i1)	F(i1)
mV	mV	
6,452	7,425	82,9158383
6,442	7,421	82,8327979
6,445	7,419	82,8890339
6,449	7,420	82,9316703
6,450	7,424	82,9016915

**Figura 5.17.** Ejemplo de cálculo para encontrar los factores  $F(ij)$  de cada lectura simultanea (Ejemplo)

- **Paso 8: Determinar el factor de calibración  $F(j)$ , para cada serie de medición “j” a partir de “n” lecturas de señales instantáneas.**

Una vez que se encontraron los factores de calibración instantáneos  $F(ij)$  para cada lectura voltaje simultánea, se calcula el factor de calibración de la serie  $F(j)$  con la Ecuación 4.2, descrita a continuación.

$$F(j) = \frac{F_r \sum_{i=1}^n V_r(ij)}{\sum_{i=1}^n V_p(ij)}$$

**Ecuación 4.2.** Factor de calibración por serie

$$F(1) = \frac{F_r \sum_{i=1}^{180} V_r(i1)}{\sum_{i=1}^{180} V_p(i1)} = \frac{1218,104}{1406,982} * 95,4198 = 82.610 (W/m^2 * mV)$$

Donde,  $\sum_{i=1}^{180} V_r(i1)$  es la sumatoria de 1 hasta 180 mediciones instantáneas de voltaje correspondientes al piranómetro de referencia. Y,  $\sum_{i=1}^{180} V_p(i1)$  es la sumatoria de 1 hasta 180 mediciones instantáneas de voltaje correspondientes al piranómetro de prueba.

Luego de esta operación, se encuentra el factor de calibración en la serie uno,  $F(1)$  igual a 82,610 ( $W/m^2 * mV$ ).

En la Figura 5.18, se muestra resumidamente este ejemplo cálculo.

$F(j) = \frac{F_r \sum_{i=1}^n V_r(ij)}{\sum_{i=1}^n V_p(ij)}$		
Sumatoria de $V_r(i1)$	Sumatoria de $V_p(i1)$	$F(1)$
1218,104	1406,982	82,6104032

**Figura 5.18.** Cálculo para encontrar el factor  $F(j)$  de una serie de medición (Ejemplo)

➤ **Paso 9: Rechazo y estabilidad de mediciones**

Para conocer la estabilidad de condiciones de calibración durante la serie, se realiza el cálculo de la desviación estándar de los 180 valores de  $F(ij)$ , utilizando la función de Excel “=DESVEST.M(180 valores de  $F(ij)$ )”, tal como se ve en la Figura 5.19.

Desviación estandar F(i1)
0,194304046

**Figura 5.19.** Estabilidad de medición para en una serie [ $\sigma (F(ij))$ ]

Consiguiendo la desviación estándar de  $F(ij)$  en la primera serie igual a  $0,1943 \left(\frac{W}{m^2 \cdot mV}\right)$ , que indica una buena estabilidad.

Luego, se rechaza los datos instantáneos de voltaje involucrados en problemas durante el proceso de calibración, como los valores de  $F(ij)$  que se desvía  $\pm 2\%$  de  $F(j)$ .

En este ejemplo no se obtuvo ningún dato erróneo debido factores externos en el proceso de calibración, por lo que se procede a encontrar las desviación de cada factor  $F(ij)$  respecto al factor  $F(j)$ , con la Ecuación 4.3 del manual según la condición establecida anteriormente.

$$\text{Desviación \%} = \frac{F(ij) - F(j)}{F(j)} * 100$$

**Ecuación 4.3.** Desviación del factor de calibración instantáneo

Donde,  $F(ij)$  es el primer factor de calibración instantáneo y  $F(j)$  el factor de calibración de la primera serie.

$$\text{Desviación \%} = \frac{F(1,1) - F(1)}{F(1)} * 100 = \frac{82,916 - 82,610}{82,610} * 100 = 0,370 \%$$

Como el porcentaje de desviación no es superior al 2%, no se elimina  $F(1,1)$ .

En la Figura 5.20, se observa una tabla con el filtro de desviación para cada factor instantáneo.

Filtro de Desviación
0,370%
0,269%
0,337%
0,389%
0,353%
0,315%

**Figura 5.20.** Filtro de desviación (Ejemplo)

Como consideración, el filtro de desviación elimina datos según la estabilidad de la serie de medición. Por ejemplo, en la primera serie la desviación estándar  $F(ij)$  es  $0,194 \left(\frac{W}{m^2 \cdot mV}\right)$ , que indica una buena estabilidad. A causa de esto, ningún factor de calibración instantáneo se eliminado con el filtro de desviación anteriormente mencionado. Sin

embargo, cuando la desviación estándar de los factores  $F(ij)$  es mayor a 0,3 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), se empiezan a eliminar los factores de calibración instantáneos a medida que suba el valor de la desviación estándar, que a su vez indica menor estabilidad.

Una vez filtrados los datos, se procede a realizar nuevamente el octavo paso en base a los datos limpios.

Como ningún factor de calibración instantáneo fue eliminado en la serie, se obtiene el mismo factor de calibración  $F(1)$  igual a 82,610 ( $W/m^2 \cdot mV$ ), tal como se ve en la Figura 5.21.

Vr Limpios (i1)	Vp Limpios (i1)	F Limpios (i1)	Suma_Vr(i1)	Suma_Vp(i1)	F(1) ( $W/m^2 \cdot mV$ )
mV	mV	( $W/m^2 \cdot mV$ )	1218,10447	1406,981907	82,61040316
6,452	7,425	82,91583828			
6,442	7,421	82,83279786			
6,445	7,419	82,88903389			

**Figura 5.21.** Repetición del octavo paso en base a los datos limpios (Ejemplo)

Los pasos 7,8 y 9 se realizan para todas las 15 series de medición. Una vez que se hayan encontrado todos los factores de calibración por serie, se calcula la desviación estándar de los factores  $F(j)$  para conocer la estabilidad de las condiciones de medición durante todo el proceso de calibración.

➤ **Paso 10: Encontrar el factor de calibración final de todo el proceso de calibración.**

Como en este proceso de calibración la temperatura del aire en todas la series no varió  $\pm 10$  °C. Se emplea la Ecuación 4.6 para encontrar el factor de calibración final del proceso.

$$F = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F(j)$$

**Ecuación 4.6.** Factor de calibración final del proceso

Donde,  $\sum_{j=1}^{15} F(j)$  es la sumatoria de todos los factores  $F(j)$  de las 15 series de medición.

$$F = \frac{1}{15} \sum_{j=1}^{15} F(j) = \frac{1}{15} * (1238,883) = 82,592 \text{ (} W/m^2 * mV \text{)}$$

Por lo tanto, el factor final del proceso de calibración con el método tipo la en condiciones de cielo sin nubes y estable es de 82,592 ( $W/m^2 \cdot mV$ ).

Resumidamente, se presenta dos tablas. En la primera tabla se expone: el número de serie, los factores de calibración  $F(j)$ , la fecha y la hora de recolección de datos, la variación de la temperatura del aire, la estabilidad de condiciones de medición en cada serie y el total de días que se desarrolló el proceso de calibración.

**Tabla 5.1.** Factores de calibración por serie  $F(j)$  (Ejemplo)

Número de series (m)	F(j) (W/m <sup>2</sup> *mV)	Fecha	Hora	Variación de la Temperatura del aire en la serie (°C)	Estabilidad de condiciones de medición	Número de Días
1	82,610	6/1/2024	9:00 - 9:15	1,9	0,194	1
2	82,476	6/1/2024	9:15 - 9:30	1,0	0,196	
3	82,679	6/1/2024	9:30 - 9:45	0,9	0,217	
4	82,547	6/1/2024	9:45 - 10:00	1,3	0,228	
5	83,043	6/1/2024	10:00 - 10:15	1,3	0,246	
6	83,289	6/1/2024	10:15 - 10:30	1,1	0,220	
7	83,224	6/1/2024	10:30 - 10:45	1,1	0,210	
8	83,235	6/1/2024	10:45 - 11:00	0,8	0,238	
9	82,352	7/1/2024	9:15 - 9:30	1,1	0,237	2
10	82,338	7/1/2024	9:30 - 9:45	1,4	0,273	
11	82,263	7/1/2024	9:45 - 10:00	1,2	0,241	
12	82,107	7/1/2024	10:30 - 10:45	0,8	0,275	
13	82,218	7/1/2024	10:45 - 11:00	0,8	0,220	
14	81,934	7/1/2024	13:30-13:45	0,8	0,191	
15	82,568	19/1/2024	14:00-14:15	1,4	0,300	

En cuanto a la segunda tabla, presenta de forma resumida: el factor de calibración final del proceso de calibración, la estabilidad de todo el proceso y la incertidumbre absoluta del factor final.

**Tabla 5.2.** Factor de calibración final (Ejemplo)

Factor de calibración final en condiciones de cielo sin nubes y estable	
Estabilidad de todo el proceso de calibración (Desviación estándar F(j) (W/m <sup>2</sup> .mV))	0,428
Incertidumbre absoluta	± 0,111
Número de series de mediciones (m)	15
Sumatoria de los factores de calibración de todas las series ( $\sum_{j=1}^m F(j)$ )	1238,883
Factor de calibración final (W/m <sup>2</sup> .mV)	82,592
Factor de calibración final expresado en ( $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$ )	12,108

**Nota:** Es recomendable medir la temperatura del aire para cada serie de medición. En caso de no poder corregir el factor de calibración con las Ecuación 4.4 y 4.5 del manual, se tiene que descartar esa serie de medición y tomar las mediciones donde la variación de temperatura no supere los límites establecidos, pero obteniendo el mínimo de series establecidas para cada condición de cielo.

## ANEXO III. INFORMES DE CALIBRACIÓN TIPO IA

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		
	<b>INFORME DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS</b>		
<b>NOMBRE:</b>	Escuela Politécnica Nacional		<b>NÚMERO INFORME:</b>
<b>DIRECCIÓN:</b>	Av. Ladrón de Guevara E11-253, Quito 170143		
<b>1. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE PRUEBA</b>			
<b>Fabricante:</b>	EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.	<b>Tipo/Clase:</b>	Termoeléctrico/ Clase C
<b>Número de serie:</b>	S20062082	<b>Posición de calibración de fábrica:</b>	En incidencia normal (tipo IIc)
<b>Observaciones:</b>	Este piranómetro fue calibrado con la norma ISO/IEC 9847 con el método tipo IIc.	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	
<b>2. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE REFERENCIA</b>			
<b>Fabricante:</b>	EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.	<b>Tipo/Clase:</b>	Termoeléctrico/Clase A
<b>Número de serie:</b>	S22008383	<b>Jerarquía de trazabilidad:</b>	Standard Secondary
<b>Observaciones:</b>	Este piranómetro fue calibrado con la norma ISO/IEC 9847 con el método tipo IIc y es trazable a la WRR.	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	
<b>3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN</b>			
<b>Tipo de procedimiento:</b>	Tipo Ia (ISO 9847)	<b>Latitud:</b>	-0,209642
<b>Longitud:</b>	-78,4897601	<b>Altitud:</b>	2807,8853 m
<b>Fecha de calibración:</b>	23/12/2023 hasta 02/01/2024	<b>Hora de calibración :</b>	Horarias en las 51 series de medición
<b>Número de series de medición :</b>	51	<b>Número de lecturas instantáneas :</b>	720
<b>Observaciones :</b>	La calibración se realizó en condiciones de cielo nublado e inestable, con series horarias en diferentes horas del día. Además, en todas las series de medición la temperatura del aire no vario en $\pm 10$ °C.		
<b>3. RESULTADOS</b>			
<b>Factor de calibración:</b>	81,750 (W/m <sup>2</sup> *mV) ó 12,232 (uV/W*m <sup>-2</sup> )	<b>Desviación estandar F(j)</b>	0,647
<b>Incertidumbre absoluta del Factor de calibración</b>	81,75 $\pm$ 0,091 (W/m <sup>2</sup> *mV)	<b>Ilustración del lugar de calibración</b>	

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		
	<b>INFORME DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS</b>		
<b>NOMBRE:</b>	Escuela Politécnica Nacional		<b>NÚMERO INFORME:</b>
<b>DIRECCIÓN:</b>	Av. Ladrón de Guevara E11-253, Quito 170143		
<b>1. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE PRUEBA</b>			
<b>Fabricante:</b>	EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.	<b>Tipo/Clase:</b>	Termoeléctrico/ Clase C
<b>Número de serie:</b>	S20062082	<b>Posición de calibración de fábrica:</b>	En incidencia normal (tipo IIc)
<b>Observaciones:</b>	Este piranómetro fue calibrado con la norma ISO/IEC 9847, con el método tipo IIc.	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	
<b>2. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE REFERENCIA</b>			
<b>Fabricante:</b>	EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.	<b>Tipo/Clase:</b>	Termoeléctrico/Clase A
<b>Número de serie:</b>	S22008383	<b>Jerarquía de trazabilidad:</b>	Standard Secondary
<b>Observaciones:</b>	Este piranómetro fue calibrado con la norma ISO/IEC 9847 con el método tipo IIc y es trazable a la WRR.	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	
<b>3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN</b>			
<b>Tipo de procedimiento:</b>	Tipo Ia (ISO 9847)	<b>Latitud:</b>	-0,209642
<b>Longitud:</b>	-78,4897601	<b>Altitud:</b>	2807,8853 m
<b>Fecha de calibración:</b>	6/12/2023 hasta 19/01/2024	<b>Hora de calibración :</b>	Las series de medición duraron 15 minutos
<b>Número de series de medición :</b>	15	<b>Número de lecturas instantáneas :</b>	180
<b>Observaciones :</b>	La calibración se realizó en condiciones de cielo sin nubes y estable, con series de 15 minutos en diferentes horas del día. Además, en todas las series de medición la temperatura del aire no vario en $\pm 10$ °C.		
<b>3. RESULTADOS</b>			
<b>Factor de calibración:</b>	82,592 (W/m <sup>2</sup> *mV) ó 12,108 (uV/W*m <sup>-2</sup> )	<b>Desviación estandar F(j)</b>	0,428
<b>Incertidumbre absoluta del Factor de calibración</b>	82,592 $\pm$ 0,111 (W/m <sup>2</sup> *mV)	<b>Ilustración del lugar de calibración</b>	

# ANEXO IV. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN ORIGINAL DE LOS PIRANÓMETROS USADOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN

- CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN EKO MS-80



EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.  
1-21-8 Hatagaya, Shibuya-ku,  
Tokyo 151-0072 Japan  
P. +81.3.3469.6713  
F. +81.3.3469.6719  
www.eko.co.jp

## Calibration Certificate

Requester : EKO INSTRUMENTS Europe B.V. ISO/IEC 17025:2017  
Lulofsstraat 55, Unit 28, 2521 AL,  
Den Haag, The Netherlands



Manufacturer : EKO Instruments Co., Ltd.  
Description : Pyranometer Certificate Number : S22008383-EX22-271  
Model : MS-80 Issue Date : July 05, 2022  
ISO Classification : Class A Calibration Date : June 30, 2022  
Serial Number : S22008383 Calibration Procedure : LM-10  
Accessories :

### Calibration Conditions

Temperature	25±3	[°C]
Irradiance	1000±50	[W/m <sup>2</sup> ]
Solar Simulator Instability	0.3	[%]

### Calibration Results

Sensitivity	10.48	[μV/W·m <sup>-2</sup> ]
Uncertainty	0.56	[%] (Coverage factor $k = 1.96$ )

The above product is calibrated and traceable to the reference pyranometer in compliance with ISO/IEC9847 Direct beam calibration (type IIc). Measurement uncertainties at the time of calibration are consistent with the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

Reference Instruments	Model	S/N	Calibration due
Pyranometer	MS-80	S19046549	2022/12/9
Digital Multimeter	34401A	3146A24500	2022/8/26

EKO Instruments Co., Ltd.  
1-21-8, Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo, 151-0072, Japan  
M.Kita / Calibration responsible

Certificate Number : S22008383-EX22-271

Page 1/2

Calibration Results							
<i>n</i>	Ref. Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Pyranometer Output [mV]	Sensitivity [ $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	<i>n</i>	Ref. Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Pyranometer Output [mV]	Sensitivity [ $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
1	1020.2	10.69	10.48	6	1020.2	10.69	10.47
2	1020.2	10.69	10.47	7	1020.2	10.69	10.48
3	1020.2	10.69	10.48	8	1020.2	10.69	10.48
4	1020.2	10.69	10.48	9	1020.2	10.68	10.47
5	1020.2	10.69	10.47	10	1020.2	10.69	10.48
$\Sigma$ Mean ( <i>n</i> = 10)		10.69	10.48				
Std. deviation			0.0032				

#### Calibration Procedure

The pyranometer was calibrated against a reference pyranometer using a 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5 class AAA) sun simulator as source. The pyranometer is situated on a horizontal table and aligned to the optical axis of a normal incidence light source. By alternating the position of the calibrated reference pyranometer with the test pyranometer the output signal of both pyranometers are recorded and used to solve the equation of the unknown sensitivity variable. The operating conditions are maintained constant (e.g. ambient temperature and normal incidence irradiance), hence the pyranometer uncertainty figure from 10 readings (*n*) is determined by taking into account uncertainty of the sensitivity of reference (*U<sub>s</sub>*), uncertainty of temperature (*U<sub>t</sub>*), repeatability (*U<sub>r</sub>*), Lamp stability (*L<sub>s</sub>*), and distribution of the sensitivity of the pyranometer (*d*).

#### Uncertainty

The expanded calibration uncertainty associated with the pyranometer sensitivity figure is calculated as the square root of the sum of the squares of the reported uncertainties:

1) Uncertainty of reference ( <i>U<sub>s</sub></i> )	0.26%
2) Uncertainty of temperature ( <i>U<sub>t</sub></i> )	0.03%
3) Repeatability ( <i>U<sub>r</sub></i> )	0.10%
4) Lamp stability ( <i>L<sub>s</sub></i> )	0.03%
5) Distribution ( <i>d</i> )	0.01%
Total uncertainty ( <i>U<sub>c</sub></i> )	0.28%
Expanded uncertainty ( <i>U</i> )	0.56% ( <i>Coverage factor k = 1.96</i> )

$$\text{Expanded Uncertainty} = 1.96 \times \sqrt{(U_s)^2 + U_t^2 + U_r^2 + L_s^2 + d^2}$$

#### Traceability

Every 1 year the reference pyranometer MS-80 is calibrated against an absolute cavity radiometer PMO6 according to the sun-and-shade method described in ISO9846. The PMO6 is directly traceable to the WRR (World Radiometric Reference) and maintained in the group of standard radiometers calibrated every 5 years during the IPC (International Pyrheliometric Comparison). The digital multimeter is traceable to JEMIC (Japan Electric Meters Inspection Corporation).

• CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN EKO MS-40



EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.  
1-21-8 Hatagaya, Shibuya-ku,  
Tokyo 151-0072 Japan  
P. +81.3.3469.6713  
F. +81.3.3469.6719  
www.eko.co.jp

## Calibration Certificate

Requester : EKO INSTRUMENTS Europe B.V. ISO/IEC 17025:2017  
Lulofsstraat 55, Unit 28, 2521 AL,  
Den Haag, The Netherlands



Manufacturer : EKO Instruments Co., Ltd.  
Description : Pyranometer Certificate Number : S20062082-EX21-334  
Model : MS-40 Issue Date : October 15, 2021  
ISO Classification : Class C Calibration Date : October 14, 2021  
Serial Number : S20062082 Calibration Procedure : LM-10  
Accessories :

### Calibration Conditions

Temperature	25±3	[°C]
Irradiance	1000±50	[W/m <sup>2</sup> ]
Solar Simulator Instability	0.3	[%]

### Calibration Results

Sensitivity	12.37	[ $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
Uncertainty	0.77	[%] (Coverage factor $k = 1.96$ )

The above product is calibrated and traceable to the reference pyranometer in compliance with ISO/IEC9847 Direct beam calibration (type IIc). Measurement uncertainties at the time of calibration are consistent with the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

Reference Instruments	Model	S/N	Calibration due
Pyranometer	MS-40	S19122122	2021/12/7
Digital Multimeter	34401A	3146A24500	2022/8/26

EKO Instruments Co., Ltd.  
1-21-8, Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo, 151-0072, Japan  
M.Kita / Calibration responsible

Certificate Number : S20062082-EX21-334

Page 1/2

### Calibration Results

<i>n</i>	Ref. Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Pyranometer Output [mV]	Sensitivity [ $\mu\text{V/W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	<i>n</i>	Ref. Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Pyranometer Output [mV]	Sensitivity [ $\mu\text{V/W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
1	1028.48	12.72	12.37	6	1028.48	12.72	12.37
2	1028.48	12.72	12.37	7	1028.48	12.72	12.37
3	1028.48	12.72	12.37	8	1028.48	12.72	12.37
4	1028.48	12.72	12.37	9	1028.48	12.72	12.37
5	1028.48	12.72	12.37	10	1028.48	12.72	12.37
$\Sigma$ Mean ( <i>n</i> = 10)		12.72	12.37				
Std. deviation			0.0006				

### Calibration Procedure

The pyranometer was calibrated against a calibrated reference pyranometer using a 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5 class AAA) sun simulator as source. The pyranometer is situated on a horizontal table and aligned to the optical axis of a normal incidence light source. By alternating the position of the calibrated reference pyranometer with the test pyranometer the output signal of both pyranometers are recorded and used to solve the equation of the unknown sensitivity variable. The operating conditions are maintained constant (e.g. ambient temperature and normal incidence irradiance), hence the pyranometer uncertainty figure from 10 readings (*n*) is determined by taking into account the sensitivity uncertainty (*Us*), uncertainty of temperature (*Ut*), normal distribution (*d*), and repeatability (*Ur*) of the reference pyranometer and the max. deviation of the incident irradiance between the measurement intervals.

### Uncertainty

The expanded calibration uncertainty associated with the pyranometer sensitivity figure is calculated as the square root of the sum of the squares of the reported uncertainties:

1) Uncertainty of reference ( <i>Us</i> )	0.37%
2) Uncertainty of temperature ( <i>Ut</i> )	0.14%
3) Repeatability ( <i>Ur</i> )	0.02%
4) Distribution ( <i>d</i> )	0.00%
Total uncertainty ( <i>Uc</i> )	0.39%
Expanded uncertainty ( <i>U</i> )	0.77% (Coverage factor <i>k</i> = 1.96)

$$\text{Expanded Uncertainty} = 1.96 \times \sqrt{((Us)^2 + Ut^2 + Ur^2 + d^2)}$$

### Traceability

Every 1 years the reference pyranometer MS-40 is calibrated against the primary standard PMO-6 according to the sun-and-shade method under ISO9846. The primary standard is directly traceable to the WRR (World Radiometric Reference) and maintained in the group of standard radiometers calibrated every 5 years during the IPC. The data logger is traceable to JEMIC (Japan Electric Meters Inspection Corporation).

**ANEXO V. MANUAL DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS CON  
EL MÉTODO TIPO IA**



**MANUAL DE CALIBRACIÓN DE  
PIRANÓMETROS CON EL  
MÉTODO TIPO IA SEGÚN LA  
NORMA ISO 9847**

**AUTOR:** JUAN PABLO MORALES POZO

**DIRECTOR:** DR. FREDDY ORDÓÑEZ

**VERSIÓN N°1**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO .....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
1. RESUMEN.....	2
2. ALCANCE.....	2
3. DEFINICIONES .....	2
4. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN.....	5
4.1. INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA SU CALIBRACIÓN .....	5
4.2. TRATAMIENTO MATEMÁTICO .....	8
5. REGISTRO DE CALIBRACIÓN.....	11
6. REFERENCIAS .....	12

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Tipos de radiación solar [3, p. 11].....	3
<b>Figura 3.2.</b> Piranómetro.....	3
<b>Figura 3.3.</b> Partes de un piranómetro [6].....	3
<b>Figura 4.1.</b> Secuencia lógica para la configuración general de un Data Logger .....	5
<b>Figura 4.2.</b> Condiciones de cielo sin nubes y estable .....	6
<b>Figura 4.3.</b> Condiciones de cielo con algunas nubes e inestable .....	7
<b>Figura 4.4.</b> Condiciones de cielo nublado e inestable.....	7



## 1. RESUMEN

Este manual presentará los principales pasos a seguir para la calibración de piranómetros de campo utilizando un piranómetro de referencia trazable a la World Radiometric Reference (WRR), guiados principalmente con la norma ISO 9847, la cual garantiza calibrar estos instrumentos de manera confiable y precisa.

Este manual estará conformado por tres pilares que serán importantes para establecer una base sólida de conocimientos en el proceso de calibración. El primer pilar comprenderá definiciones y conceptos importantes de radiación solar e instrumentación.

El segundo pilar resumirá de manera clara y concisa el procedimiento de calibración de los piranómetros, usando el método de calibración en exteriores con una mesa de calibración horizontal (tipo Ia). Mientras que, el tercer pilar presentará una plantilla de informe de calibración de piranómetros, especificando las características de los instrumentos usados como los resultados obtenidos durante el proceso de calibración.

El objetivo de este manual es brindar al personal técnico encargado de la supervisión y calibración de estos instrumentos una guía resumida de calibración, con la finalidad de obtener mediciones confiables de radiación solar.

## 2. ALCANCE

El manual de calibración detallará resumidamente los procedimientos necesarios para la calibración de piranómetros utilizando un piranómetro patrón, según la norma ISO 9847. El método de calibración que se abordará es el tipo Ia, que usa una mesa de calibración común, con un ángulo de cero grados respecto a la horizontal.

## 3. DEFINICIONES

En los siguientes puntos, se encuentran definiciones importantes para entender el proceso de calibración:

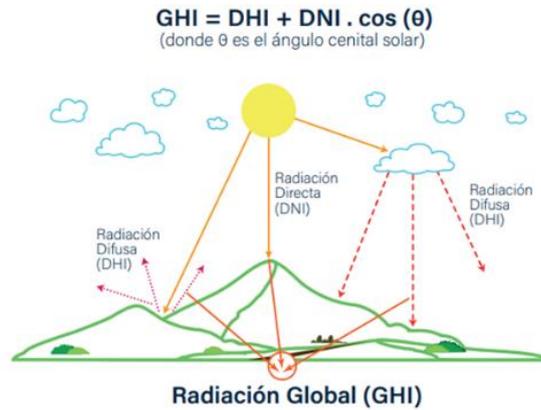
- **Radiación solar:** Es la energía expulsada por el sol que recorre el espacio exterior hasta llegar a la tierra en forma de luz y calor [1]. El flujo de radiación solar que llega a la atmósfera terrestre se la conoce como constante solar extraterrestre ( $G_{sc}$ ) y se la define como la energía del sol por unidad de tiempo en un área de superficie perpendicular. Esta constante tiene un valor estimado de  $1368 \pm 0,65 \text{ W/m}^2$  [2], [3].
- **Irradiancia solar:** Es la velocidad a la que impacta la radiación solar sobre una superficie y sus unidades son  $\text{W/m}^2$  [2].
- **Tipos de radiación solar:** Existen dos tipos de radiación solar; La Irradiancia Normal Directa (DNI) y la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI). La DNI es la radiación que llega a la superficie terrestre sin interactuar con la atmósfera, y la DHI es la radiación solar que es redireccionada y/o reflejada por la interacción de elementos que se encuentran en la atmósfera, como la capa de ozono ( $\text{O}_3$ ), material particulado, etc. La suma algebraica, de estos dos tipos de radiación da como resultado a la Irradiancia Global Horizontal (GHI), y se la expresa con la Ecuación 3.1 [3, p. 11].

$$GHI = DHI + DNI * \cos(\theta)$$

**Ecuación 3.1.** Relación matemática de la GHI



Donde  $\theta$ , es el ángulo cenital solar.



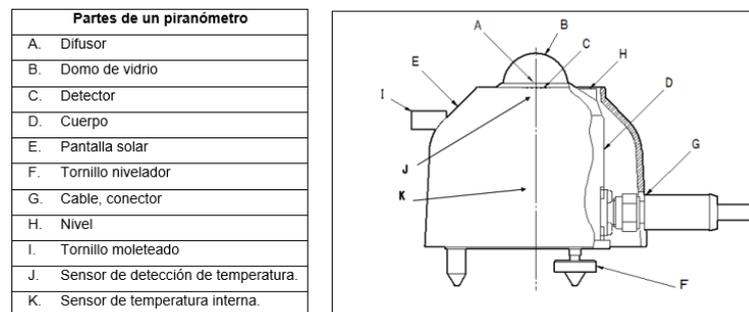
**Figura 3.1.** Tipos de radiación solar [3, p. 11]

- **Piranómetro:** Es un radiómetro que mide la irradiancia global horizontal (GHI) en un plano. Los tipos más comunes de piranómetros son los “termoeléctricos” y “fotoeléctricos”. El primero tipo de piranómetro usa una termopila para estimar la radiación solar, a causa de una variación de temperatura, que instantáneamente se transforma en una señal eléctrica. Mientras que, el “fotoeléctrico” usa una célula fotovoltaica para medir la radiación solar y transformarla en una señal eléctrica. [2, p. 44], [4], [5]. En la Figura 3.2 se puede observar un piranómetro del tipo “termoeléctrico”.



**Figura 3.2.** Piranómetro

- **Partes de un piranómetro:** Las principales partes de un piranómetro son: el sensor, el cuerpo y el domo de vidrio. En la Figura 3.3, se observa a mayor detalle las partes de un piranómetro [6].



**Figura 3.3.** Partes de un piranómetro [6].



- **Clasificación de piranómetros:** La norma ISO 9060 clasifica a un piranómetro de acuerdo con el grado de precisión que tengan. Esta clasificación se la representa con las letras A, B y C. La letra A (Secondary Standard) representa una buena precisión, y los piranómetros clasificados con esta letra se los conoce como de referencia o patrón. Por otro lado, las letras B (First class) y C (Second class) se les atribuye a los piranómetros con un menor grado de precisión. Generalmente, estos piranómetros son usados para la medición de radiación solar en el campo [4].
- **Piranómetro de campo:** Es un piranómetro utilizado para el monitoreo constante de radiación solar. Estos instrumentos suelen descalibrarse por su exposición continua ante factores ambientales como, la humedad y el calor, por largos periodos de tiempo. A causa de esto, se realiza evaluaciones constantes para verificar su desajuste [5].
- **Piranómetro de referencia:** Es un piranómetro que posee excelentes características en precisión y trazabilidad. Este instrumento es usado exclusivamente para calibrar piranómetros de clases inferiores [5].
- **Piranómetro de prueba:** Es el piranómetro que se encuentra en un proceso de calibración[5].
- **Mesa de calibración común:** Es una estructura en la que se colocan los piranómetros para su proceso de calibración. Algunas de estas mesas suelen tener varios ángulos de inclinación de acuerdo con el tipo de calibración que se realice [5].
- **Registrador de datos (Data Logger):** Es un dispositivo encargado leer y grabar datos en tiempo real, como por ejemplo; voltaje, corriente, temperatura, etc. Este dispositivo detecta las señales eléctricas o digitales producidas por los sensores, para su posterior análisis empleando un software que se encuentra incluido en el dispositivo [7].
- **Ecuación que transforma la señal eléctrica de los piranómetros en irradiancia:** Los piranómetros analógicos que manda una señal eléctrica diferencial, usan una ecuación lineal para convertir la señal eléctrica en irradiancia. Esta ecuación se la observa a continuación [6], [8].

$$I = \frac{V}{S}$$

### Ecuación 3.2. Ecuación que transforma la señal eléctrica en irradiancia

Donde:

- $I$  es la irradiancia solar ( $W/m^2$ ).
- $V$  es la señal de voltaje en (mV).
- $S$  es la sensibilidad del piranómetro en ( $\mu V/W \cdot m^2$ ).

En algunos casos, la sensibilidad se la modifica utilizando la inversa ( $S^{-1}$ ), con el fin de brindar mayor comodidad al realizar la operación de transformación. El orden de sus unidades cambia de ( $\mu V/W \cdot m^2$ ) a ( $W \cdot m^2 / \mu V$ ).

La mayoría de data loggers leen señales que van en la escala de los milivoltios (mV), por lo que es recomendable cambiar de microvoltios a milivoltios ( $W \cdot m^2 / mV$ ).

Al final, se tiene la Ecuación 3.2 expresada de la siguiente forma.

$$I = V * S^{-1} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$



### Ecuación 3.2. Ecuación que transforma la señal eléctrica en irradiancia

Es importante mencionar que, en la mayoría de los manuales de usuario de los piranómetros, el factor de calibración se lo conoce como sensibilidad.

## 4. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Esta sección se divide en dos partes, la primera llamada “Instalación de equipos para su calibración” y la segunda “Tratamiento matemático”. Resumidamente, todo el proceso de calibración se sistematiza en diez pasos.

### 4.1. INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA SU CALIBRACIÓN

Este proceso de instalación va a ser resumido en seis pasos. Se recomienda antes de empezar con el proceso de instalación, verificar que las características técnicas de los instrumentos sean compatibles con las entradas receptoras de señal del data logger.

➤ **Paso 1: Verificar el entorno del proceso de calibración.**

La mesa de calibración tiene que estar ubicada estratégicamente para que ningún objeto a su alrededor provoque sombra o interfiera con la calibración del instrumento.

➤ **Paso 2: Colocar los piranómetros en la mesa de calibración.**

Los piranómetros al final de la instalación tienen que estar correctamente nivelados y orientados.

**Nota:** La convención que sugiere la norma es tomar como referencia las entradas de los cables de señal de cada instrumento, las cuales tienen que estar orientadas hacia el ecuador o a cualquier polo cercano.

➤ **Paso 3: Revisar la polaridad de señal de los piranómetros, continuidad eléctrica de los cables, intensidad y estabilidad de señal.**

La polaridad de señal de los instrumentos suele estar especificadas en los manuales de usuario. Por otro lado, para verificar la intensidad de señal y continuidad eléctrica de los cables, se recomienda usar un multímetro.

➤ **Paso 4: Conectar los cables de señal a las entradas del Data Logger.**

Para realizar una conexión óptima de los cables de señal en las entradas del data logger, se utilizan los manuales de usuario de los piranómetros y del dispositivo.

➤ **Paso 5: Realizar la configuración para el registro de datos en el software del Data Logger.**

La mayoría de estos dispositivos trabajan con la misma secuencia lógica de configuración, tal como se observa en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Secuencia lógica para la configuración general de un Data Logger

En los siguientes puntos, se presenta una breve descripción de las etapas de configuración de un data logger.



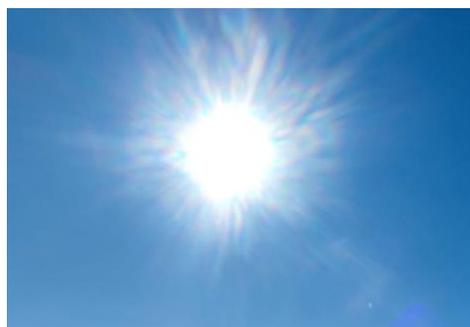
- **Crear un archivo registrador:** Primero, se crea un archivo nuevo de configuración en el software del dispositivo, con el nombre específico de la tarea a realizar.
- **Configurar las entradas de lectura de señal:** Luego, se configura las entradas del dispositivo para detectar las señal digitales o analógicas de los instrumentos a utilizar.
- **Configurar el registro de las mediciones:** Posteriormente, se especifica el momento que se va a realizar el registro, el intervalo de recolección de datos y el formato de impresión de las mediciones en un archivo txt o csv, tomando en cuenta las unidades de medición y el intervalo de tiempo de registro.
- **Enviar la nueva configuración al data logger:** Después, se envía la nueva configuración a la memoria interna del dispositivo, y así empezar de forma inmediata con el registro de las mediciones.
- **Realizar un diagnóstico de configuración:** Finalmente, para tener una mejor confiabilidad en la lectura de mediciones, la mayoría de los data loggers posee una sección de diagnóstico de configuración. En la cual, se puede observar cualquier interferencia en la configuración. Además, dependiendo del software del dispositivo, se puede visualizar las mediciones de los instrumentos en tiempo real.

➤ **Paso 6: Recolectar datos acorde a las condiciones de cielo.**

Para el proceso de calibración (tipo Ia), se especifica tres formas de recolección de datos según las condiciones de cielo.

- **Condiciones de cielo sin nubes y estable:** Para estas condiciones, se deben recolecta simultáneamente mediciones instantáneas de señal para ambos piranómetros de manera continua, durante un mínimo de quince series que duren entre diez a veinte minutos. Además, cada serie de medición debe de tener más de veintiuna mediciones instantáneas de señal.

La toma de mediciones tiene que realizarse durante un periodo mínimo de dos a tres días, desde las primeras horas en la mañana hasta la tarde, para así obtener una amplia gama de datos. En la Figura 4.2, se presenta un ejemplo de condiciones de cielo sin nubes y estable.



**Figura 4.2.** Condiciones de cielo sin nubes y estable

**Nota:** Estas condiciones se dan cuando no existe obstrucción de nubes o la DNI ocupa el 80 % del total de la GHI. Si la recolección de datos se lo realiza de forma automática utilizando un data logger, se verifica un valor mínimo de irradiancia que indique la presencia de nubes. Es importante destacar que, en ciertas temporadas del año estas condiciones de cielo son difíciles de observar, pero son las más rápidas y estables para realizar el proceso de calibración.



- **Condiciones de cielo con algunas nubes e inestable:** Para estas condiciones, se deben recolectar simultáneamente mediciones instantáneas de señal en ambos instrumentos de manera continua, en intervalos que duren entre uno a cinco minutos, desde la mañana hasta el atardecer, en un mínimo de cinco días y hasta dos semanas. Se tiene que elegir correctamente el periodo de tiempo para obtener como mínimo, quince series de medición, integradas con más de veintiuna mediciones instantáneas de señal en cada instrumento.



**Figura 4.3.** Condiciones de cielo con algunas nubes e inestable

**Nota:** Estas condiciones de cielo ocurren cuando las nubes se encuentran a 30 grados alrededor del sol. Además, la inestabilidad en la lectura de los piranómetros es a causa de la variabilidad en la nubosidad.

- **Condiciones de cielo nublado:** Para estas condiciones, se deben tomar mediciones instantáneas de señal de forma simultánea, integradas en cincuenta o más series de medición en intervalos de una hora para ambos piranómetros. Además, las series de medición horarias se las recolecta en un mínimo de diez días, en distintas horas del día y diferentes tipos de nubosidad, verificando que la irradiancia solar global media (GHI) sea superior a  $100 \text{ W/m}^2$ . En la Figura 4.4, se presenta estas condiciones de cielo.



**Figura 4.4.** Condiciones de cielo nublado e inestable

**Nota:** Estas condiciones de cielo se dan cuando existe gran presencia de nubes alrededor del sol, provocando cambios bruscos en la irradiancia solar, y mayor inestabilidad en la lectura de los instrumentos y del data logger. Por tal motivo, este proceso de calibración es el que requiere mayor tiempo de calibración, pero dependiendo de la ubicación geográfica y temporada climática del año, son las condiciones con mayor frecuencia de observación.



## 4.2. TRATAMIENTO MATEMÁTICO

El siguiente tratamiento matemático es sugerido por la norma ISO 9847, y se lo describe en cuatro pasos, los cuales son complementarios con los pasos detallados anteriormente.

➤ **Paso 7: Encontrar los factores de calibración instantáneos  $F(ij)$  a partir de las señales instantáneas de los piranómetros**

Con la Ecuación 4.1, se obtiene el factor de calibración instantáneo  $F(ij)$ , a partir de dos lecturas de señal instantáneas.

$$F(ij) = \frac{V_r(ij)}{V_p(ij)} * F_r$$

**Ecuación 4.1.** Factor de calibración instantáneo

Donde:

- $V_r(ij)$  y  $V_p(ij)$  son señales eléctricas instantáneas en milivoltios (mV) del piranómetro de referencia y de prueba respectivamente, en la serie  $j$ .
- $F_r$  es el factor de calibración del piranómetro de referencia en (W/m<sup>2</sup>·mV).

**Nota:** Este factor de calibración se lo conoce como la sensibilidad del instrumento y sus unidades son en (μV/W·m<sup>2</sup>). En otras palabras, el factor de calibración del piranómetro de referencia es la inversa de la sensibilidad del instrumento en milivoltios.

Para encontrar los demás factores de calibración instantáneos  $F(ij)$  de la serie, se reemplaza la Ecuación 4.1, con las lecturas instantáneas de señal de ambos instrumentos recolectadas de forma simultánea. Debido a que se maneja un gran número de datos, se trabaja con programas computacionales como “Excel” de Microsoft.

➤ **Paso 8: Determinar el factor de calibración  $F(j)$ , para cada serie de medición “ $j$ ” a partir de “ $n$ ” lecturas de señales instantáneas.**

Con la Ecuación 4.2, se encuentra el factor de calibración de una serie de medición  $j$ .

$$F(j) = \frac{F_r \sum_{i=1}^n V_r(ij)}{\sum_{i=1}^n V_p(ij)}$$

**Ecuación 4.2.** Factor de calibración por serie

Donde:

- $\sum_{i=1}^n V_r(ij)$ , es el sumatorio de todas las señales instantáneas del piranómetro de referencia.
- $\sum_{i=1}^n V_p(ij)$ , es el sumatorio de todas las señales instantáneas del piranómetro de prueba.
- $F_r$  es el factor de calibración del piranómetro de referencia.

En todas las series de medición del proceso de calibración, se tiene que determinar el factor de calibración  $F(j)$ .



➤ **Paso 9: Rechazo y estabilidad de mediciones**

Para determinar la estabilidad de las condiciones de calibración durante una serie de medición, se calcula la desviación estándar de los valores  $F(ij)$  alrededor de su valor medio. Adicionalmente, para conocer la estabilidad de las condiciones durante todo el proceso de calibración, se determina la desviación estándar de los valores  $F(j)$ , una vez que se encuentren todos los factores de calibración por serie.

Luego, se rechaza los datos instantáneos de voltaje involucrados en problemas durante el proceso de calibración, como los valores de  $F(ij)$  que se desvía  $\pm 2\%$  de  $F(j)$ . El filtro de limpieza de los datos  $F(ij)$  de la serie, se encuentra descrito en la Ecuación 4.3.

$$\text{Desviación \%} = \frac{F(ij) - F(j)}{F(j)} * 100$$

**Ecuación 4.3.** Desviación del factor de calibración instantáneo

Donde:

- $F(ij)$  es el factor de calibración instantáneo.
- $F(j)$  es el factor de calibración de la serie  $j$ .

Una vez que se haya filtrado estos datos, se repite el paso número ocho en base a los datos limpios.

**Nota:** La desviación estándar de los valores  $F(ij)$ , está relacionado de manera directa con el filtro de desviación. A medida que la desviación estándar aumenta, los factores de calibración instantáneos son eliminados.

➤ **Paso 10: Encontrar el factor de calibración final de todo el proceso de calibración.**

Si durante una serie de mediciones  $j$  la temperatura  $T$  se desvía  $\pm 10$  °C del valor típico  $T_n$ , se calcula el factor de calibración de la serie corregido por la temperatura, con la Ecuación 4.4.

$$F_{corr}(j, T_n) = F(j) \left( \frac{R_T[T(j)]}{R_T[T_n]} \right)$$

**Ecuación 4.4.** Corrección del Factor de calibración en la serie

Una vez que se haya conseguido todos los factores de calibración por serie corregidos por la temperatura, se determina el factor final de calibración corregido ( $F_{corr}$ ), con la Ecuación 4.5.

$$F_{corr} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F_{corr}(j, T_n)$$

**Ecuación 4.5.** Corrección del Factor de calibración de todo el proceso

Donde

- $T(j)$  es la temperatura media del aire en la serie de mediciones en °C.
- $R_T[T(j)]$  y  $R_T[T_n]$  son las responsabilidades de temperatura del piranómetro de prueba en  $T(j)$  y  $T_n$ , y se sabe que  $R = 1/F$ .



**Nota:** Para ciertos tipos de piranómetros, se conoce que el coeficiente  $\alpha$  de responsabilidad de temperatura viene dado por la siguiente relación:  $R[T(j)] = \{1 + \alpha [T(j) - T_n]\}$ .

En caso de que no sea necesario realizar la corrección del factor de calibración o no sea posible corregirlo, se calcula el factor de calibración final para un número total de  $m$  series de mediciones, con la Ecuación 4.6.

$$F = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F(j)$$

#### Ecuación 4.6. Factor de calibración final del proceso

Donde:

- $m$  es número de todas las series de medición.
- $\sum_{j=1}^m F(j)$ , es la sumatoria de todos los factores de calibración por serie.

Una vez que se haya encontrado el factor de calibración final, se concluye con el proceso de calibración.

#### RECOMENDACIÓN

Para verificar el error y el ajuste entre las mediciones del piranómetro de prueba respecto al patrón, antes y después del proceso de calibración, se recomienda usar indicadores estadísticos como RMSE (Root Mean Square Error) y MBE (Mean Bias Error), los cuales se encuentran descritos en las Ecuaciones 4.7 y 4.8.

$$RMSE \% = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n (I_{p,i} - I_{r,i})^2}{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n I_{r,i}^2}} * 100$$

#### Ecuación 4.7. RMSE [3]

$$MBE \% = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n (I_{p,i} - I_{r,i})}{\left(\frac{1}{n}\right) * \sum_{i=1}^n I_{r,i}} * 100$$

#### Ecuación 4.8. MBE [3]

Donde:

- $n$  es el número de mediciones instantáneas obtenida en la serie de medición.
- $I_{p,i}$  y  $I_{r,i}$  son las mediciones de irradiancia solar instantáneas de los piranómetros de prueba y referencia respectivamente, en la serie de medición.

**Nota:** Es necesario considerar, la irradiancia del piranómetro de prueba  $I_{p,i}$  cambia acorde al factor de calibración que se analice. En cambio, la irradiancia  $I_{r,i}$  del instrumento patrón o de referencia, es la misma en todo el análisis, debido a que no cambia su factor de calibración y es considerado como la referencia en la medición.



## 5. REGISTRO DE CALIBRACIÓN

Una vez concluido el proceso de calibración se presenta un formato de informe de calibración, el cual deberá incluir como mínimo: la información relacionada a los piranómetros de prueba y de referencia, el procedimiento de calibración referenciado y el resultado de calibración.

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>		
	<b>INFORME DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS</b>		
<b>NOMBRE:</b>		<b>NÚMERO INFORME:</b>	
<b>DIRECCIÓN:</b>			
<b>1. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE PRUEBA</b>			
<b>Fabricante:</b>	Se especifica el nombre de la empresa que elaboró el instrumento	<b>Tipo/Clase:</b>	Existen varios tipos de piranómetros, entre los más conocidos son los "termoelectrónicos" y "fotoelectrónicos". Adicionalmente, se coloca la clasificación del piranómetro
<b>Número de serie:</b>	Se escribe el número de serie de fabricación del piranómetro de prueba	<b>Posición de calibración de fábrica:</b>	Según el método de calibración, existen varios tipos de inclinaciones en la calibración del piranómetro. Por ejemplo, en una posición tipo IIc, donde el instrumento se encuentra en incidencia normal a la fuente de calibración
<b>Observaciones:</b>	Se detalla la norma con la que se calibró el instrumento de prueba y el método de calibración usado	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	Se presenta una imagen del instrumento a calibrar
<b>2. INFORMACIÓN DEL PIRANÓMETRO DE REFERENCIA</b>			
<b>Fabricante:</b>	Se especifica el nombre de la empresa que elaboró el instrumento patrón	<b>Tipo/Clase:</b>	Se especifica el tipo de piranómetro patrón, el cual tiene que ser del mismo tipo del piranómetro de prueba.
<b>Número de serie:</b>	Se escribe el número de serie de fabricación del piranómetro patrón	<b>Jerarquía de trazabilidad:</b>	Por lo general, la jerarquía de los piranómetros patrón se la conoce como Standard Secondary
<b>Observaciones:</b>	Se detalla la norma con la que se calibró el instrumento patrón y el método de calibración usado	<b>Ilustración del piranómetro:</b>	Se presenta una imagen del instrumento patrón
<b>3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN</b>			
<b>Tipo de procedimiento:</b>	Se referencia la norma con la que se calibró el piranómetro de prueba y el método de calibración usado	<b>Latitud:</b>	Latitud del lugar de calibración
<b>Longitud:</b>	Longitud del lugar de calibración	<b>Altitud:</b>	Altitud del lugar de calibración
<b>Fecha de calibración:</b>	Es el total de días que duró el proceso de calibración	<b>Hora de calibración :</b>	El periodo de tiempo que duró el proceso de calibración
<b>Número de series de medición :</b>	Es el total de las series de calibración recomendadas por el método de calibración usado	<b>Número de lecturas instantáneas de medición:</b>	Es el total de lecturas instantáneas de medición en la serie, por lo general son más de veintinueve lecturas
<b>Observaciones :</b>	Se especifica las condiciones en las que se realizó el proceso de calibración		
<b>3. RESULTADOS</b>			
<b>Factor de calibración:</b>	Se coloca el factor de calibración final obtenido en el proceso	<b>Desviación estándar F(j)</b>	Se refiere a la estabilidad de condiciones de medición en todo el proceso de calibración
<b>Incertidumbre absoluta del Factor de calibración</b>		<b>Ilustración del lugar de calibración</b>	Se presenta una imagen del lugar donde se realizó el proceso de calibración



## 6. REFERENCIAS

- [1] "RADIACIÓN SOLAR - IDEAM." Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>
- [2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [3] Vaca Diego and Ordóñez Freddy, "Mapa\_Solar\_del\_Ecuador\_2019", Accessed: Jan. 13, 2024. [Online]. Available: <https://meteo-scinergy.epn.edu.ec/mapa-solar>
- [4] "INTERNATIONAL STANDARD ISO 9060 Second edition Solar energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation  
Énergie solaire-Spécification et classification des instruments de mesurage du rayonnement solaire hémisphérique et direct," 2018.
- [5] "INTERNATIONAL STANDARD ISO 9847 'First edition Solar energy-Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer,'" 1992.
- [6] "PIRANÓMETRO\_ms-80-80s-80u-manual", Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.eko-instruments.com/media/luufdy1v/ms-80-80s-80u-manual.pdf>
- [7] "Que es un data logger - la última guía | Dewesoft." Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-data-logger>
- [8] "PIRANÓMETRO\_ms-40\_40 manual", Accessed: Jan. 15, 2024. [Online]. Available: [https://www.eko-instruments.com/media/nbljpwdg/ms-40\\_40s\\_manual20231013v8.pdf](https://www.eko-instruments.com/media/nbljpwdg/ms-40_40s_manual20231013v8.pdf)

