

# Intercomparación de radiómetros UVA y eritémicos, Argentina-2022

Nota Técnica SMN 2023-156

**Fernando Nollas<sup>1</sup>, Julián Lell<sup>1</sup>, Sebastián Papandrea<sup>1</sup>, Gregor Hülsen<sup>2</sup>, Julian Gröbner<sup>2</sup>, Pablo Orte<sup>3,4</sup>, Eduardo Luccini<sup>4,5</sup>, Gerardo Carbajal Benitez<sup>1</sup>, Elian Wolfram<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Servicio Meteorológico Nacional. Argentina*

<sup>2</sup> *Physical Meteorological Observatory, Centro Mundial de Radiación. Davos-Suiza.*

<sup>3</sup> *Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, CITEDEF. Argentina*

<sup>4</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET. Argentina.*

<sup>5</sup> *Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica. Argentina*

Diciembre 2023

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina opera una red solarimétrica en el territorio nacional, monitoreando, entre otros parámetros radiativos, la radiación solar ultravioleta A (UVA) y la radiación solar ultravioleta eritémica (UVE). Dado el desgaste ocasionado por la condición de intemperie a la que se encuentran expuestos los radiómetros solares, es necesaria una calibración periódica de los mismos contra uno o más sensores patrones, los cuales deben tener trazabilidad con el Centro Mundial de Radiación (PMOD/WRC) de Davos. De esta manera los datos obtenidos en los sitios de medición estarán homogeneizados, estandarizados y serán comparables a nivel local y global.

En este trabajo se presentan los procedimientos y resultados de la intercomparación (IC) de radiómetros UVA y UVE llevada a cabo en el Observatorio Central de Buenos Aires entre los meses de noviembre y diciembre de 2022. Esta IC fue propuesta por el Laboratorio de Calibración e Intercomparación de Radiómetros Solares (LACIRS), dependiente de la Dirección Central de Monitoreo del Clima (DCMC), como una actividad regional; en la misma se calibraron radiómetros propios de la red del SMN y de otras instituciones nacionales, así como un radiómetro de la Universidad de la República (Uruguay), mas específicamente del Laboratorio de Energía Solar (LES). En total participaron 18 radiómetros UVE, 7 radiómetros UVA y 1 radiómetro dual UVA/E, obteniéndose el factor de calibración junto con su incertidumbre expandida para 25 instrumentos. Los resultados obtenidos demostraron la necesidad de dar de baja uno de los radiómetros por la deriva en su constante de calibración y corroboraron el buen funcionamiento del resto. Se realizó un detallado análisis de incertidumbres asociadas a la constante de calibración de cada radiómetro, obteniéndose incertidumbres relativas que van desde 5% hasta 17%.

## Abstract

The Servicio Meteorológico Nacional (SMN) of Argentina operates a solarimetric network in the national territory, monitoring, among other radiative parameters, solar ultraviolet A radiation (UVA) and solar ultraviolet erythemic radiation (UVE). Given the wear caused by the weather conditions to which the solar radiometers are exposed, periodic calibration of them against one or more reference sensors is necessary, which must have traceability with the World Radiation Center (PMOD/WRC) in Davos. In this way the data obtained at the measurement sites will be standardized and comparable at a local and global level.

This work presents the procedures and results of the intercomparison (IC) of UVA and UVE radiometers carried out at the Observatorio Central de Buenos Aires between the months of November and December 2022. This IC was proposed by the Laboratorio de Calibración e Intercomparación de Radiómetros Solares (LACIRS), dependent on the Dirección Central de Monitoreo del Clima (DCMC), as a regional activity. In it, radiometers from the SMN network and other national institutions were calibrated, as well as a radiometer from the Universidad de la República (Uruguay), more specifically from the Laboratorio de Energía Solar (LES).

In total, 18 UVE radiometers, 7 UVA radiometers and 1 dual UVA/E radiometer participated. The results obtained demonstrated the need to interrupt the service of one of the radiometers due to the drift in its calibration constant and corroborated the good functioning of the rest.

A detailed analysis of uncertainties associated with the calibration constant of each radiometer was carried out, obtaining relative uncertainties ranging from 5% to 17%.

**Palabras clave:** Radiación solar UV eritémica, calibración, intercomparación, UVA.

**Citar como:** Nollas, F., J. Lell, S. Papandrea, G. Hülsen, J. Gröbner, P. Orte, E. Luccini, G. Carbajal Benitez, E. Wolfram, 2023: Intercomparación de radiómetros uva y eritémicos, Argentina-2022. Nota Técnica SMN 2023-156.

## 1. INTRODUCCIÓN

Todo sensor que mida, de manera operativa y continua cualquier parámetro meteorológico, debe ser calibrado regularmente contra alguna referencia primaria de modo que las mediciones obtenidas por estos sensores en sus sitios de medición sean homogéneas y estandarizadas, a nivel local y global. En el caso de los radiómetros solares que miden radiación solar ultravioleta A (UVA) y radiación solar ultravioleta eritémica (UVE), estos deben ser comparados contra uno o más sensores patrones con trazabilidad al Centro Mundial de Radiación (PMOD/WRC) de Davos, en lo que se denomina Intercomparación de Radiómetros (IC).

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con una red de estaciones en las cuales se mide de forma continua la radiación solar UVA y UVE dentro de la República Argentina. Mientras que algunas estaciones responden al proyecto de Vigilancia Global de la Atmósfera (GAW) y miden desde hace más de 20 años, otros pertenecen al proyecto SAVER-NET y fueron instalados más recientemente (Orte y otros, 2022). La mayoría de los radiómetros UVE que conforman la red del SMN fueron calibrados durante el año 2018 utilizando dos radiómetros que habían sido calibrados por el PMOD/WRC en 2017 como se presenta en Nollas y otros (2019). En cambio, los radiómetros UVA solo contaban con calibración de fábrica. Por esta razón, el SMN envió tres radiómetros al PMOD/WRC, dos que miden UVE y uno que mide UVA, para que participen del International UV Filter Radiometer Comparison (UVC-III; Hülsen y Gröbner, 2023), desarrollado durante los meses de verano en el hemisferio norte durante 2022. De esta manera, dichos radiómetros obtuvieron trazabilidad al WRC y los mismos pueden utilizarse como patrones secundarios para calibrar radiómetros de campo.

En Nollas y otros (2019) se presentan los antecedentes de calibraciones anteriores de los radiómetros UVE que opera el SMN, los cuales se realizaron, con mayor o menor participación de radiómetros, en 2001 (Cede y otros, 2002), 2006, 2010, 2014 y 2018.

El proceso completo de calibración y caracterización de un radiómetro UVE, explicado en Nollas y otros (2019) y desarrollado por Hülsen y Gröbner (2007), requiere el uso de un laboratorio *indoor* para poder caracterizar la respuesta espectral y angular de cada sensor. Conociendo ambas respuestas, y utilizando un modelo de transferencia radiativa, es posible obtener factores característicos de cada radiómetro que dependen de la columna total de ozono (TOC) y del ángulo solar cenital (SZA). Dado que en nuestro caso no disponemos del instrumental sofisticado necesario para realizar la caracterización de laboratorio y la calibración detallada de campo, lo que se realiza en este caso durante la IC es una *transferencia de calibración absoluta* de un radiómetro UV (tanto UVA como UVE) completamente calibrado hacia los demás radiómetros, en condiciones de campo.

En este informe se presentan los procedimientos y resultados de la IC de radiómetros UVE y UVA llevada a cabo en el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA, Lat: -34.59, Long: -58.48°, Alt: 32m a.s.n.m.) desde el 8 de noviembre al 15 de diciembre de 2022. Para dicha IC se utilizaron como instrumentos de referencia dos sensores UVE y un sensor UVA, todos calibrados en 2022 en el PMOD/WRC, Davos, obteniendo así su trazabilidad.

Este evento representó un hito para el SMN en cuanto a que es la primera vez que la institución realiza, de manera autónoma, una intercomparación en la que participen otros países de la región y también porque los radiómetros UVA de la Institución nunca habían sido calibrados. De igual manera, ratifica la importancia que el SMN otorga a la confiabilidad de sus mediciones de radiación UV.

## 2. INSTRUMENTAL

### 2.1 Sensores de referencia

Atendiendo al hecho de que el SMN opera diferentes marcas de radiómetros UVE, se decidió enviar a Davos, para su participación en el UVC-III (Hülßen y Gröbner, 2023), dos radiómetros UVE con diferentes características. Por un lado, se envió el radiómetro de marca Kipp&Zonen (K&Z), modelo UV-S-E-T y número de serie 170213, cuya salida es analógica y puede conectarse a alguno de los *dataloggers* marca Campbell de los que dispone el SMN. Según el certificado de calibración obtenido en Davos, el factor de calibración de este radiómetro presenta un valor de  $(0.1807 \pm 0.0073) \text{ Wm}^{-2}/\text{V}$ , valor muy similar al hallado por Nollas y otros (2019) en 2018, el cual fue de  $0.19 \text{ Wm}^{-2}/\text{V}$ . Desde su adquisición, este radiómetro solo se utilizó para medir en la ciudad de S.M. de Tucumán durante 2017 y 2018.

Por otro lado, teniendo en cuenta que varios de los radiómetros a calibrar son digitales, también se envió al UVC-III (Hülßen y Gröbner, 2023) el radiómetro UV de la marca Solar Light (SL), modelo 501 y número de serie 16723, el cual posee su propio sistema de adquisición. Este sensor fue enviado al PMOD/WRC anteriormente en 2017 para su calibración, obteniéndose en ese momento un factor de calibración de  $(1.066 \pm 0.055)$ . En su participación del UVC-III (Hülßen y Gröbner, 2023), el factor de calibración de este radiómetro fue de  $(1.091 \pm 0.035)$ . Esto muestra que este radiómetro posee una alta estabilidad en el tiempo, lo cual lo vuelve una buena referencia para su uso como patrón. Este radiómetro se mantiene guardado y se utiliza únicamente durante intercomparaciones.

El radiómetro UVA enviado a Davos para su calibración es de la marca Kipp&Zonen, modelo UV-S-A-T y número de serie 170143. Este sensor no posee otra calibración que la de fábrica y, desde su adquisición, solo se utilizó para medir en la ciudad de S.M. de Tucumán durante 2017 y 2018.

### 2.2 Sensores de campo

Los sensores que participaron de la IC de radiómetros UV se detallan en la Tabla I, donde se puede ver el tipo de instrumento, Institución a la que pertenece y el sitio de medición. Se aclara que se indica el sitio en el que cada instrumento realizará las mediciones luego de la calibración dado que, durante la IC, se decidió dar de baja algunos sensores que estaban realizando mediciones operativas. Por lo tanto, el sitio que aparece en la Tabla I es en donde dicho sensor será instalado, ya sea que midiera allí antes o no.

**Tabla I.** Radiómetros que se calibraron durante la IC de radiómetros UV durante 2022, sitio donde miden e institución a la que pertenecen.

NÚMERO DE SERIE	MARCA Y MODELO	SITIO DE MEDICIÓN	PROPIETARIO	ESTADO FÍSICO
<b>UV ERITÉMICOS</b>				
170212	Kipp&Zonen UV-S-E-T	PILAR	SMN	No contó con burbuja niveladora
120059	Kipp&Zonen UV-S-E-T	SALTA	UNSa	
100013	Kipp&Zonen UV-AE	SALTO (Uruguay)	LES	
130805	YES UVB-1	BARILOCHE	SMN	
90703	YES UVB-1	REFERENCIA	CITEDEF	

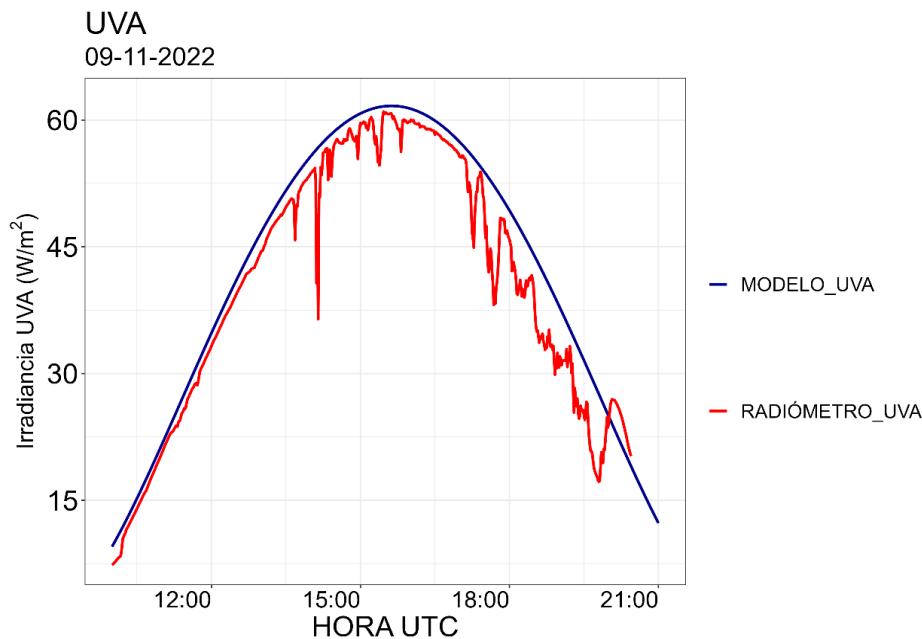
130803	YES UVB-1	COM. RIVADAVIA	SMN	No contó con burbuja niveladora y no regula temperatura
940602	YES UVB-1	LA QUIACA	SMN	
60703	YES UVB-1	NEUQUÉN	SMN	
130806	YES UVB-1	RIO GALLEGOS	SMN	No contó con burbuja niveladora
970811	YES UVB-1	CÓRDOBA	UNC	Fuente propia. Superficie levemente degradada
130804	YES UVB-1	VILLA MARTELLI	SMN	No contó con burbuja niveladora y no regula temperatura. Superficie degradada
1866	SOLAR LIGHT 501	USHUAIA	SMN	No regula temperatura.
1870	SOLAR LIGHT 501	MENDOZA	SMN	
1871	SOLAR LIGHT 501		SMN	
2747	SOLAR LIGHT 501	BUENOS AIRES	SMN	No regula temperatura.
2748	SOLAR LIGHT 501	-	SMN	No regula temperatura.
2753	SOLAR LIGHT 501	-	SMN	No regula temperatura.
9004	SOLAR LIGHT 501	-	SMN	No regula temperatura. Superficie degradada
S97088.02	EKO MS-2010D	TANDIL	CITEDEF	
<b>UVA</b>				
170144	Kipp&Zonen UV-S-A-T	PILAR	SMN	No contó con burbuja niveladora
120214-1	YES UVA-1	BARILOCHE	SMN	No contó con burbuja niveladora
120214-2	YES UVA-1	RIO GALLEGOS	SMN	No contó con burbuja niveladora
120214-3	YES UVA-1	COM. RIVADAVIA	SMN	Mal funcionamiento
120214-4	YES UVA-1	VILLA MARTELLI	SMN	No contó con burbuja niveladora y no regula temperatura. Superficie degradada
60428-2	YES UVA-1	NEUQUÉN	SMN	
S99014.06	EKO MS-210-A	TANDIL	CITEDEF	

Tal como figura en la Tabla I, el radiómetro UVA YES 120214-3 presentó un mal funcionamiento que impidió su calibración. Se estima que el problema estuvo en su fuente de control.

Se deja constancia en este informe que, luego de una inspección visual, los radiómetros SL9002, SL1872 y SL1865, que participaron en intercomparaciones pasadas, han sido dados de baja porque ya no se encuentran físicamente aptos para medir debido al estado de su superficie sensora. Asimismo, se informa que el radiómetro SL14078, que auspició de patrón en la IC realizada en 2018, presentó problemas en su estabilización de temperatura, no permitiendo conocer si la misma se estaba realizando. Por ello, el mismo no participó en esta IC y se evaluará su disponibilidad para el futuro.

### 3. VERIFICACIÓN PREVIA

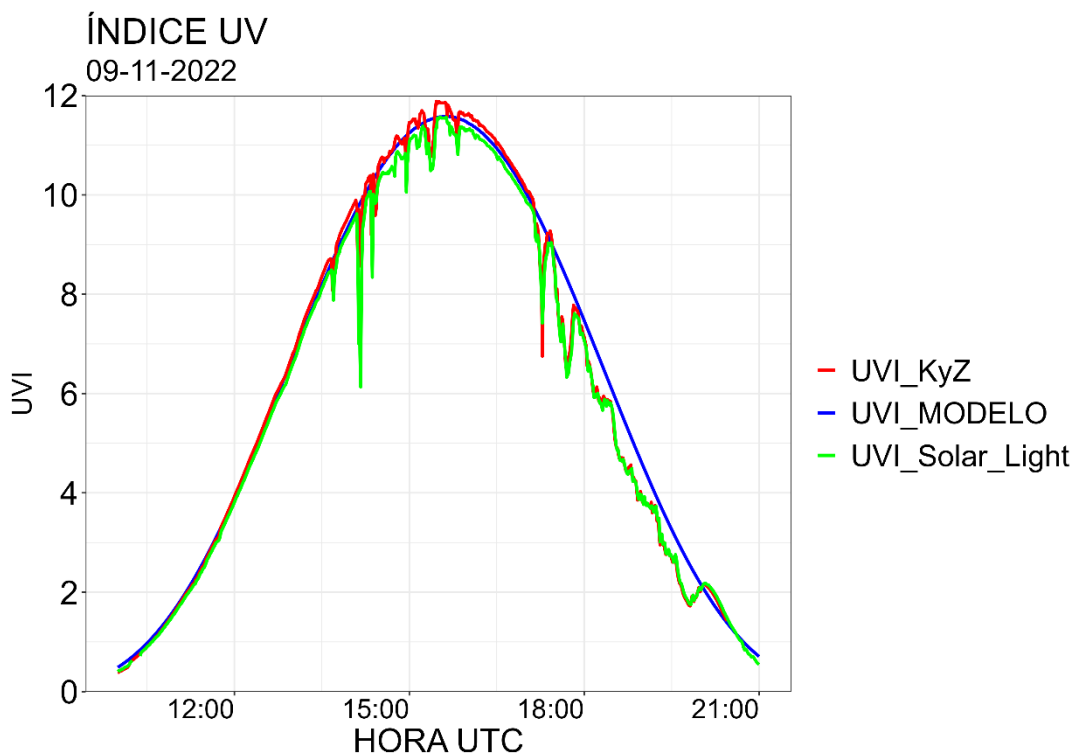
Cuando los radiómetros arribaron a Buenos Aires luego de su calibración en Davos, los mismos se instalaron para analizar los datos obtenidos en comparación contra el modelo TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible), el cual simula las condiciones de cielo claro y permite obtener estimaciones de irradiancia solar UVA y también del índice UV, entre otros. Si bien se esperaba poder realizar esta verificación durante septiembre u octubre, por motivos administrativos y de logística los radiómetros de referencia no volvieron de Davos para las fechas previstas, lo que ocasionó que esta verificación deba realizarse durante la IC. En la Figura 1 se muestra la comparación entre el modelo y las mediciones para el rango UVA obtenidas el día 09-11-2022. Se observa que las mediciones obtenidas por el radiómetro UVA, que luego se usó como referencia durante la IC, presentan valores levemente por debajo de los estimados por el modelo, lo cual puede deberse a que las entradas del mismo resultan de condiciones estándar (ideales) y pueden diferir de las condiciones reales. Viendo la similitud entre las mediciones y las estimaciones del modelo, y teniendo en cuenta la incertidumbre de las mediciones del radiómetro, se concluyó que el radiómetro estaba en condiciones de auspiciar como referencia.



**Fig. 1:** Mediciones obtenidas por el radiómetro UVA s/n 170143 luego de que el mismo volviera de Davos (línea roja) en comparación contra estimaciones de irradiancia UVA obtenidas con el modelo TUV (línea azul).

Por otro lado, la Figura 2 muestra el comportamiento obtenido por ambos radiómetros UVE calibrados en Davos en comparación al modelo TUV. En este caso, no es la irradiancia eritémica la que se utilizó como parámetro de comparación sino el índice UV (UVI). Esta variable representa una medida de la intensidad de la radiación UV y su capacidad de producir eritema en los humanos. El UVI se obtiene matemáticamente al multiplicar por 40 a la irradiancia eritémica en  $Wm^{-2}$  y fue adoptado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como el indicador homologado para informar a la población acerca del riesgo ante la exposición a la radiación solar.

En términos generales se observa un comportamiento similar entre ambos radiómetros, lo cual es esperable debido a que ambos se encuentran calibrados en Davos y con todas sus características determinadas en laboratorio. Asimismo, ambos radiómetros, dentro del error experimental y de la incertidumbre en sus constantes de calibración, muestran mediciones similares a las obtenidas utilizando el modelo TUV.



**Fig. 2:** Mediciones obtenidas por los radiómetros UVE s/n 170213 (línea roja) y 16723 (línea verde), ambos calibrados en Davos, en comparación contra estimaciones de UVI obtenidas con el modelo TUV (línea azul) para el día 09-11-2023.

#### 4. METODOLOGÍA

El protocolo general de instalación, medición y mantenimiento de los radiómetros durante la IC sigue los lineamientos establecidos en Nollas y otros (2019). Todos los sensores se instalaron, a medida que fueron arribando a Buenos Aires desde sus estaciones, sobre una plataforma diseñada exclusivamente para llevar a cabo intercomparaciones de sensores de radiación solar la cual se encuentra en el techo de la casilla Dobson (Figura 3).



Antes de instalar cada radiómetro se corroboró el estado del mismo, se cambió el disecante (sílica gel) que absorbe de humedad interna siempre que se pudo y se limpió la cúpula con alcohol isopropílico.

Los radiómetros de marca SL poseen un sistema propio de adquisición, el cual se conecta a la PC a través de un puerto serie. Durante esta IC, todos los radiómetros de esta marca se conectaron a la misma PC a través de un *hub usb* mediante el uso de adaptadores serie-usb por la cantidad de puertos serie que se habrían requerido. En la adquisición de datos de estos radiómetros se aplicó un factor de escala 10 para incrementar la resolución de los valores almacenados como dosis MED integradas sobre 1 minuto. Asimismo, para la adquisición de los datos a partir de cada *datalogger*, se utilizó un *script* desarrollado en Python e implementado en LINUX. Los radiómetros SL tienen la particularidad de que la unidad adquisidora almacena no solo los valores minutales de dosis MED sino también la temperatura interna del sensor, la cual permite verificar si el mismo se encuentra térmicamente estabilizado. Si bien esto permitió identificar radiómetros que no regulaban la temperatura, no representó un problema ya que, según el manual, la misma unidad adquisidora puede implementar una corrección por temperatura a los datos. Se aclara también que la función de *offset* nocturno de dicha unidad adquisidora no fue considerada para ninguno de los radiómetros SL con la finalidad de poder verificar los valores de *offset* nocturno arrojados por cada sensor.



**Fig. 3:** Radiómetros instalados en la mesada durante la IC.

Por otro lado, los radiómetros de las marcas K&Z, Yankee Environmental System (YES) y EKO fueron conectados a *dataloggers* de la marca Campbell Scientific (modelos CR1000 y CR1000X). Se utilizaron los *dataloggers* CR1000 s/n 82759, CR1000X s/n 23382 y CR1000X s/n 38118. Los *dataloggers* CR1000X cuentan con su última calibración realizada en el año 2022 y el CR1000 en el año 2016. Estos *dataloggers* fueron configurados para adquirir el dato instantáneo medido cada 5 segundos. Los valores de temperatura

interna de estos radiómetros no fueron adquiridos debido a la cantidad de canales que esto habría requerido, pero la estabilidad fue evaluada utilizando un voltímetro y observando, en diferentes días, los valores de resistencia (en el caso de los YES) y tensión (en el caso de los K&Z). Los YES deben arrojar valores cercanos a 39 Ohm mientras que los K&Z deben arrojar tensiones similares a 2.5 V para asegurar que están estabilizados térmicamente. No fue aplicada ninguna corrección en los valores crudos obtenidos por los radiómetros YES que no estabilizaran temperatura.

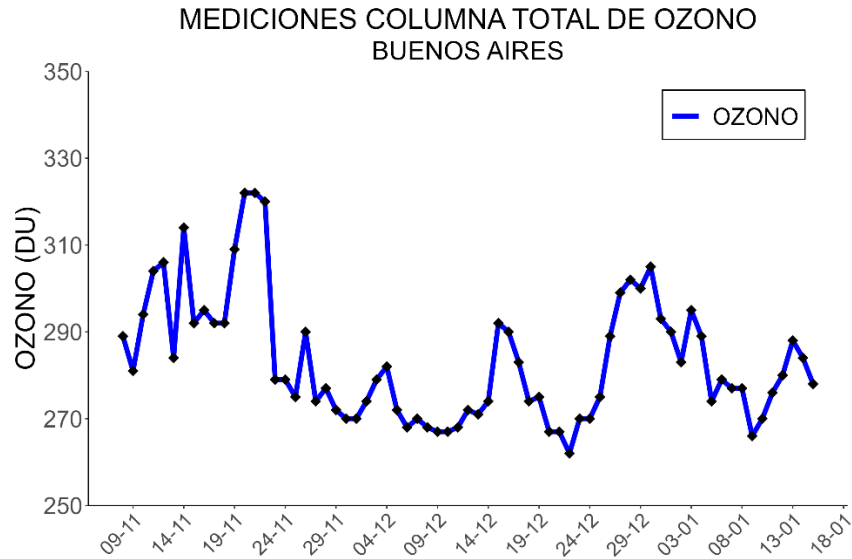
Siguiendo el manual de cada instrumento, los radiómetros K&Z fueron conectados de manera *single-ended* (SE) mientras que los radiómetros YES y EKO se conectaron de manera diferencial (Diff).

Durante la IC se realizaron mantenimientos continuos, consistentes en la limpieza de la cúpula y control de nivelación todas las mañanas, control visual de los datos a cada momento y control visual de los instrumentos a fin de detectar irregularidades. De hecho, durante esta rutina de mantenimiento se encontró humedad condensada dentro de 2 radiómetros (YES 60703 y YES 120214-3), por lo que se solucionó mediante el cambio continuo de su sílica desecante y la colocación de teflón en la rosca donde se inserta la misma. Por otro lado, para permitir la nivelación de los instrumentos que no poseían burbuja niveladora durante la IC, se utilizó un sistema manual consistente en una burbuja externa dispuesta sobre una arandela, la cual se colocó sobre la parte horizontal de los radiómetros. Se entiende que la mejor manera de operar y, particularmente calibrar un radiómetro, es utilizando la nivelación de fábrica pero, al no contar con la misma, este sistema permitió realizar la calibración mientras se buscaba una solución definitiva. Se deja constancia de que, terminada la IC de radiómetros UV, se realizaron algunos ensayos y los sensores de Villa Martelli y Río Gallegos ya cuentan con un sistema de nivelación. Se está trabajando para la implementación de un sistema para el resto de los radiómetros que no poseen indicador de nivel.

Si bien los radiómetros están preparados para permanecer a la intemperie, lluvias intensas durante la IC obligaron a bajar el equipo YES 970811 debido a que posee una conexión externa expuesta entre el sensor y su fuente de alimentación. Asimismo, no fue posible cambiar el disecante con el que dicho sensor se recibió.

Se deja constancia también de que algunos de los radiómetros K&Z parecieron haber perdido su burbuja niveladora a simple vista, pero al raspar la superficie del nivel de burbuja se pudo corroborar que, en la mayoría de los casos, la burbuja aún se encontraba funcional. Se asocia este desgaste de la superficie del nivel de burbuja al tipo de material constructivo, el cual parece ser afectado por la tierra y la radiación solar.

Por otra parte, los valores de ozono se obtuvieron durante el desarrollo de esta IC mediante el uso del espectrofotómetro Dobson #70, el cual es, a su vez, el patrón regional, asegurando confiabilidad en los valores. Las mediciones obtenidas a partir de este instrumento permiten contar con un valor diario de TOC, expresado en unidades Dobson (DU), cuyo comportamiento durante la IC se presenta en la Figura 4.



**Fig. 4:** Mediciones de columna total de ozono obtenidas en el OCBA durante el período que duró la IC de radiómetros UV.

## 5. ANÁLISIS DE DATOS

### 5.1 Momentos de cielo claro

Debido a la estabilidad que se observa en las mediciones durante condiciones de cielo claro (sin nubosidad), es usual la utilización de días completamente claros para el análisis de los datos durante intercomparaciones de radiación solar. Sin embargo, durante esta IC de radiómetros UV fueron pocos los días completamente claros que se presentaron, lo que obligó a la consideración y obtención de momentos de cielo claro. Para esto se utilizó la metodología propuesta por Reno y Hansen (2016) con la finalidad de obtener momentos de cielo claro, para lo cual se requirieron las mediciones de irradiancia solar global horizontal (GHI por sus siglas en inglés) que se realizan en el OCBA de manera operativa, y las estimaciones de un modelo de cielo claro con el cual comparar dichas mediciones. En este caso se utilizaron las estimaciones de GHI para cielo claro ( $GHI_{cs}$ ) obtenidas por el modelo McClear, las cuales pueden descargarse a través de la página web de SODA (<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-mcclear>). Las estimaciones obtenidas por este modelo han presentado una validada performance (Lefèvre y otros, 2013; Gschwind y otros, 2019). Estudios realizados en la región donde se llevó adelante la IC también permiten observar la correspondencia entre el modelo McClear y mediciones terrestres (Lusi y otros; 2023). Los datos disponibles de GHI y  $GHI_{cs}$  tienen una resolución minutil, la cual no coincide con la resolución de adquisición de los radiómetros UV conectados a los *dataloggers* Campbell. Ante esto, se estableció que todos los valores medidos con frecuencia 5-seg de radiación UVE y UVA que estén dentro del minuto determinado como cielo claro por la metodología de Reno y Hansen (2016) se consideren también como de cielo claro.

Aparte del filtro correspondiente a momentos de cielo claro, los datos de todos los radiómetros participantes de esta IC fueron filtrados en los momentos en los que se realizaron tareas de limpieza y tareas de instalación de otros radiómetros ya que durante esos momentos se proyectaron sombras indeseadas sobre los radiómetros. Asimismo, teniendo en cuenta la arboleda aladaña dentro del predio del OCBA, únicamente se consideraron mediciones que tuvieran un ángulo solar cenital (SZA por sus siglas en inglés) menores a  $70^\circ$ .

Para los cálculos de geometría solar se utilizaron las correcciones propuestas por Reda y Andreas (2004, 2007).

## 5.2 Correcciones estándar

El procedimiento de calibración utilizado para los radiómetros UVE fue el descrito por Hülsen y Gröbner (2007) en donde se plantea que la irradiancia solar UV eritémica ( $E$ ) puede ser obtenida a partir de la expresión (1), la cual también es válida para la irradiancia solar UVA.

$$E = (U_0 - U_{offset}) \cdot C \cdot Coscor(SZA) \cdot f_n(SZA, TOC) \quad (1)$$

donde  $U_0$  representa la señal de salida cruda,  $U_{offset}$  el *offset* nocturno correspondiente a cada día y  $C$  es la constante absoluta de calibración. La función de conversión (o matriz de transferencia)  $f_n$  está normalizada a SZA de  $40^\circ$  así como TOC de 300 DU y se obtiene a través de modelos de transferencia radiativa utilizando la respuesta espectral de cada sensor medida en laboratorio. El parámetro restante,  $Coscor$ , se obtiene también a partir de mediciones de laboratorio en donde se evalúa la respuesta angular del radiómetro, por lo que representa la corrección del error coseno intrínseco de cada instrumento. En el caso de los radiómetros conectados a los *dataloggers* Campbell, la señal de salida es una tensión analógica mientras que la señal de salida de los radiómetros SL está expresada en MED.

Debido a que fueron calibrados por el PMOD/WRC, tanto en laboratorio como en campo, todas las expresiones de la expresión (1) son conocidas para los tres radiómetros que auspician de referencia en esta IC. Asimismo, los radiómetros YES 90703 y K&Z 100013 fueron calibrados en Davos en el año 2017 y 2014 respectivamente, por lo que en esta IC se utilizó la caracterización obtenida en laboratorio para cada uno de ellos, modificando únicamente la constante de calibración. De igual manera, los radiómetros K&Z 170212 y EKO S97088.02 cuentan con una caracterización espectral y angular de fábrica, la cual consta en su certificado de calibración. Cabe aclarar que la empresa K&Z ofrece una matriz de corrección que depende de SZA y TOC en la cual ya se encuentran incluidas todas las correcciones, incluyendo el factor de calibración. Por otro lado, EKO establece una matriz que depende de SZA (aunque expresada por el fabricante en función de la elevación solar) y TOC, pero adicionalmente hay que aplicar el factor de calibración. Por esta razón, durante la IC se utilizó la matriz de cada uno de estos radiómetros tal como se especificó en el certificado de calibración y únicamente se obtuvo el factor de calibración constante de corrección.

Teniendo en cuenta que no se conocen las respuestas angulares ni espectrales del resto de los instrumentos a calibrar durante la presente IC UV, se optó por seguir los lineamientos planteados en Nollas y otros (2019), utilizando respuestas espectrales y angulares nominales estándar para cada tipo de radiómetro, en base a las cuales se obtuvieron las correcciones  $f_n$  y  $Coscor$  para cada modelo de radiómetro. Las mismas fueron brindadas por personal del PMOD/WRC y se obtuvieron como un promedio de las obtenidas en las numerosas calibraciones realizadas por ellos para cada marca y modelo de radiómetro, bajo la premisa de que, si bien cada radiómetro es único y requiere una caracterización individual, las similitudes del proceso constructivo para un mismo modelo de radiómetro dentro de cada compañía podrían favorecer que tengan características similares dentro de un rango de incertidumbre. De esta manera, solo restaría establecer la constante de calibración de cada radiómetro de acuerdo a la expresión (1).

En las Tablas II a IX se muestran las correcciones  $f_n$  y  $Coscor$  en función del SZA y de la TOC para los radiómetros K&Z UV-S-E-T, SL 501, YES UVB-1 y K&Z UV-S-A-T, con la particularidad de que  $f_n$  solo depende de SZA en el caso de los últimos. Lamentablemente no se cuenta con estas correcciones para los YES UVA-1 ni para los radiómetros de marca EKO debido a que no han participado de calibraciones en el

PMOD/WRC. Se aclara que estas tablas son diferentes a las utilizadas en Nollas y otros (2019) ya que las mismas fueron actualizadas en base a nuevas calibraciones realizadas en el PMOD/WRC.

**Tabla II.** Corrección coseno estándar en función del SZA para los sensores YES UVB-1.

SZA	Coscor	SZA	Coscor
0	1.076	50	1.158
5	1.077	55	1.175
10	1.079	60	1.193
15	1.083	65	1.208
20	1.088	70	1.217
25	1.096	75	1.214
30	1.104	80	1.197
35	1.115	85	1.18
40	1.127	90	1.178
45	1.141		

**Tabla III.** Corrección coseno estándar en función del SZA para los sensores SL 501.

SZA	Coscor	SZA	Coscor
0	1.033	50	1.045
5	1.033	55	1.054
10	1.033	60	1.066
15	1.034	65	1.078
20	1.034	70	1.09
25	1.034	75	1.095
30	1.034	80	1.09
35	1.034	85	1.075
40	1.036	90	1.072
45	1.039		

**Tabla IV.** Corrección coseno estándar en función del SZA para los sensores K&Z UV-S-E-T.

SZA	Coscor	SZA	Coscor
0	0.996	50	0.988
5	0.995	55	0.988
10	0.993	60	0.988
15	0.991	65	0.988
20	0.991	70	0.988
25	0.99	75	0.993
30	0.989	80	0.995
35	0.988	85	0.993
40	0.988	90	0.992
45	0.988		

**Tabla V.** Corrección coseno estándar en función del SZA para los sensores K&Z UV-S-A-T.

SZA	Coscor	SZA	Coscor
0	0.996	50	1.003
5	0.996	55	1.005
10	0.996	60	1.007
15	0.996	65	1.009
20	0.997	70	1.011
25	0.997	75	1.011
30	0.998	80	1.008
35	0.999	85	1
40	1	90	0.995
45	1.001		

**Tabla VI.** Función de conversión estándar en función del SZA y de TOC en DU para los sensores YES UVB-1 normalizado a SZA = 40° y TO<sub>3</sub>=300 DU.

SZA	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
0	1.255	1.207	1.166	1.131	1.102	1.076	1.054	1.035	1.019	1.005	0.993
5	1.253	1.205	1.164	1.13	1.1	1.075	1.053	1.034	1.018	1.004	0.992
10	1.247	1.199	1.159	1.125	1.096	1.071	1.049	1.031	1.015	1.001	0.99
15	1.236	1.19	1.15	1.117	1.088	1.064	1.043	1.025	1.01	0.997	0.986
20	1.222	1.177	1.139	1.106	1.078	1.055	1.035	1.018	1.003	0.991	0.98
25	1.205	1.16	1.123	1.092	1.066	1.044	1.025	1.009	0.995	0.984	0.974
30	1.183	1.141	1.105	1.076	1.051	1.03	1.013	0.998	0.986	0.976	0.967
35	1.158	1.118	1.085	1.057	1.035	1.016	1	0.987	0.976	0.967	0.96
40	1.13	1.093	1.062	1.037	1.017	1	0.986	0.975	0.966	0.96	0.954
45	1.1	1.066	1.039	1.016	0.999	0.985	0.973	0.965	0.958	0.953	0.95
50	1.068	1.038	1.014	0.996	0.981	0.97	0.962	0.956	0.953	0.95	0.95
55	1.036	1.011	0.992	0.977	0.967	0.96	0.955	0.953	0.952	0.953	0.956
60	1.006	0.986	0.973	0.963	0.958	0.955	0.955	0.957	0.96	0.965	0.972
65	0.981	0.968	0.961	0.958	0.958	0.961	0.966	0.973	0.982	0.993	1.004
70	0.966	0.962	0.963	0.967	0.975	0.985	0.997	1.011	1.027	1.044	1.063
75	0.97	0.977	0.988	1.003	1.02	1.04	1.062	1.085	1.11	1.137	1.164
80	1.012	1.033	1.058	1.086	1.117	1.15	1.185	1.222	1.26	1.3	1.341
85	1.133	1.172	1.216	1.262	1.31	1.361	1.414	1.469	1.525	1.582	1.641
90	1.294	1.338	1.386	1.438	1.492	1.549	1.608	1.67	1.733	1.798	1.865

**Tabla VII.** Función de conversión estándar en función del SZA y de TOC en DU para los sensores SL 501 normalizado a SZA = 40° y TO<sub>3</sub>=300 DU.

SZA	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
0	1.13	1.106	1.085	1.067	1.052	1.039	1.027	1.018	1.01	1.003	0.997
5	1.129	1.105	1.084	1.066	1.051	1.038	1.027	1.017	1.009	1.002	0.996
10	1.126	1.102	1.081	1.064	1.049	1.036	1.025	1.016	1.008	1.001	0.995
15	1.121	1.097	1.077	1.06	1.045	1.033	1.022	1.013	1.005	0.999	0.993



<b>20</b>	1.114	1.09	1.071	1.054	1.04	1.028	1.018	1.009	1.002	0.996	0.991
<b>25</b>	1.105	1.082	1.063	1.047	1.033	1.022	1.012	1.004	0.998	0.992	0.988
<b>30</b>	1.094	1.072	1.054	1.039	1.026	1.015	1.006	0.999	0.993	0.988	0.985
<b>35</b>	1.081	1.06	1.043	1.029	1.017	1.008	1	0.994	0.989	0.985	0.982
<b>40</b>	1.066	1.047	1.031	1.019	1.008	1	0.993	0.988	0.984	0.981	0.979
<b>45</b>	1.051	1.033	1.019	1.008	0.999	0.992	0.987	0.983	0.981	0.979	0.978
<b>50</b>	1.034	1.019	1.007	0.998	0.991	0.986	0.982	0.98	0.979	0.978	0.979
<b>55</b>	1.018	1.005	0.996	0.989	0.984	0.981	0.98	0.979	0.98	0.981	0.983
<b>60</b>	1.003	0.993	0.987	0.983	0.981	0.98	0.981	0.982	0.985	0.988	0.991
<b>65</b>	0.991	0.985	0.982	0.982	0.983	0.985	0.988	0.991	0.996	1.001	1.006
<b>70</b>	0.985	0.984	0.985	0.988	0.992	0.997	1.002	1.009	1.015	1.022	1.029
<b>75</b>	0.989	0.993	0.998	1.005	1.012	1.02	1.028	1.037	1.046	1.054	1.063
<b>80</b>	1.009	1.018	1.027	1.037	1.047	1.058	1.068	1.078	1.089	1.098	1.108
<b>85</b>	1.052	1.063	1.075	1.086	1.098	1.109	1.12	1.131	1.141	1.151	1.161
<b>90</b>	1.093	1.101	1.11	1.119	1.129	1.139	1.148	1.158	1.167	1.176	1.185

**Tabla VIII.** Función de conversión estándar en función del SZA y de TOC en DU para los sensores K&Z UV-S-E-T normalizado a SZA = 40° y TO<sub>3</sub>=300 DU.

<b>SZA</b>	<b>200</b>	<b>220</b>	<b>240</b>	<b>260</b>	<b>280</b>	<b>300</b>	<b>320</b>	<b>340</b>	<b>360</b>	<b>380</b>	<b>400</b>
<b>0</b>	1.259	1.218	1.183	1.151	1.122	1.096	1.072	1.051	1.031	1.013	0.997
<b>5</b>	1.257	1.217	1.181	1.149	1.12	1.094	1.071	1.049	1.03	1.012	0.995
<b>10</b>	1.252	1.212	1.176	1.144	1.116	1.09	1.066	1.045	1.026	1.008	0.991
<b>15</b>	1.243	1.203	1.168	1.136	1.108	1.082	1.059	1.038	1.019	1.001	0.985
<b>20</b>	1.231	1.191	1.156	1.125	1.097	1.072	1.049	1.028	1.009	0.992	0.976
<b>25</b>	1.215	1.176	1.141	1.111	1.083	1.059	1.036	1.016	0.997	0.98	0.964
<b>30</b>	1.196	1.157	1.123	1.093	1.066	1.042	1.02	1	0.982	0.966	0.95
<b>35</b>	1.172	1.135	1.101	1.072	1.046	1.023	1.001	0.982	0.965	0.948	0.934
<b>40</b>	1.145	1.108	1.076	1.048	1.023	1	0.98	0.961	0.944	0.929	0.914
<b>45</b>	1.114	1.079	1.048	1.02	0.996	0.974	0.955	0.937	0.921	0.906	0.893
<b>50</b>	1.079	1.045	1.016	0.99	0.967	0.946	0.927	0.911	0.895	0.881	0.868
<b>55</b>	1.04	1.008	0.98	0.956	0.934	0.915	0.897	0.881	0.867	0.854	0.842
<b>60</b>	0.998	0.968	0.942	0.919	0.899	0.881	0.864	0.85	0.836	0.824	0.812
<b>65</b>	0.952	0.924	0.9	0.879	0.861	0.844	0.829	0.816	0.803	0.792	0.781
<b>70</b>	0.904	0.879	0.857	0.838	0.821	0.806	0.792	0.78	0.768	0.758	0.749
<b>75</b>	0.855	0.832	0.812	0.795	0.78	0.766	0.754	0.743	0.732	0.723	0.715
<b>80</b>	0.806	0.785	0.767	0.752	0.738	0.726	0.715	0.706	0.697	0.689	0.682
<b>85</b>	0.763	0.744	0.727	0.713	0.701	0.691	0.681	0.673	0.666	0.659	0.653
<b>90</b>	0.764	0.743	0.726	0.712	0.699	0.688	0.678	0.67	0.662	0.656	0.65

**Tabla IX.** Función de conversión estándar en función del SZA para los sensores K&Z UV-S-A-T.

SZA	$f_n$	SZA	$f_n$
0	0.996	50	1.003
5	0.996	55	1.005
10	0.996	60	1.007
15	0.996	65	1.009
20	0.997	70	1.011
25	0.997	75	1.011
30	0.998	80	1.008
35	0.999	85	1
40	1	90	0.995
45	1.001		

En el caso de los radiómetros UVA, y de acuerdo al certificado de calibración del radiómetro UVA K&Z 170143 expedido por el PMOD/WRC, se utiliza una expresión similar a la expresión (1), con la diferencia de que  $f_n$  depende únicamente de SZA. Por ello, si bien una calibración completa de un radiómetro UVA contemplaría la obtención de  $f_n(SZA)$  y  $Coscor(SZA)$  por tener respuestas diferentes, debido a que no es posible caracterizar las respuestas de los radiómetros YES UVA-1 y EKO UVA, en esta IC se estableció una única variable  $B(SZA)$  a determinar según se explicará más adelante (expresión 2).

$$E = (U_0 - U_{offset}) \cdot C \cdot B(SZA) \quad (2)$$

Además de las correcciones  $f_n$  y  $Coscor$ , debe tenerse en cuenta que, de acuerdo con Hülsen y Gröbner (2007) en días con cielo completamente cubierto se considera que la radiación alcanza la superficie en forma isotrópica. En estos casos se habla del factor de corrección difusa en donde el  $Coscor$ , para los radiómetros UVE, toma un valor constante que es igual a 1.072 para los sensores SL 501, 1.178 para los YES UVB-1 y 0.992 para los K&Z UV-S-E-T.

Se deja constancia de que, al realizar el análisis tanto de los datos de referencia como de los radiómetros de campo, se utilizó un ajuste polinomial de interpolación de orden 10 para cada matriz de conversión y corrección coseno, tanto en sensores patrones como en sensores de campo, que considere los ángulos 0-70° de manera tal de poder establecer un comportamiento continuo de los mismos, tal como se propuso en Nollas y otros (2019).

### 5.3 Corrección por offset nocturno

Como se explicó anteriormente, los *dataloggers* Campbell obtienen los valores de tensión de cada instrumento, donde  $V_{R0}$  corresponde a las tensiones crudas de salida de los radiómetros de referencia mientras que  $V_{F0}$  corresponde a los valores de tensión de salida cruda de cada radiómetro de campo que se pretende calibrar. Si bien los valores de salida de los SL 501 están en unidades de dosis MED, se aclara que, de acá en adelante, la notación será la misma tanto para los radiómetros SL 501 como para los radiómetros analógicos conectados a los *dataloggers* Campbell.



Para el análisis de datos y realización de los cálculos, uno de los primeros pasos fue la determinación del valor de *offset* nocturno para cada día y cada instrumento, el cual se obtuvo como un promedio de los valores de salida en condiciones tal que  $SZA > 100^\circ$  para cada día en cuestión. Esto quiere decir que se consideraron todos los valores que cumplieran esa condición durante la mañana y durante la tarde-noche de un mismo día.

De esta manera, los valores crudos de tensión de los radiómetros de referencia y los radiómetros de campo a calibrar son corregidos de acuerdo con (3) y (4).

$$V_R = V_{R0} - V_{R\ off} \quad (3)$$

$$V_F = V_{F0} - V_{F\ off} \quad (4)$$

## 5.4 Obtención del factor de calibración con correcciones

Debido a la multiplicidad y variedad de radiómetros participantes durante esta IC, el hecho de contar con dos radiómetros de referencia UVE calibrados por el PMOD/WRC posibilitó también calibrar los radiómetros participantes de acuerdo a la forma de adquisición y a las características constructivas. De esta manera, el radiómetro SL 16723 sirvió como referencia para todos los radiómetros SL de campo mientras que el K&Z 170213 fue el patrón para la calibración de todos los radiómetros conectados a los *dataloggers* Campbell, los cuales adquirieron los datos de manera estandarizada y similar. Esto no representó inconvenientes para el caso de los radiómetros UVA, ya que solo se contó con un patrón secundario y todos se conectaron a *dataloggers* Campbell.

Durante el análisis de los datos para obtener el factor de calibración se observaron algunos *outliers*, que son mediciones que distan mucho del comportamiento lineal esperado. Teniendo en cuenta el mantenimiento continuo que recibieron los instrumentos y que se encontraron sobre la misma mesada, estas mediciones se consideran espurias y podrían ser producto de algún insecto o pájaro que, circunstancialmente, proyectó sombra sobre alguno de los sensores en cuestión. Los datos finalmente considerados a la hora de realizar los cálculos fueron los que se encontraron en  $\pm 1$  desviación estándar de la media.

### 5.4.1 Radiómetros Kipp&Zonen (UVA y UVE), SL 501, YES (UVE) y EKO (UVE)

Una vez realizadas todas las consideraciones planteadas en las secciones 5.1, 5.2 y 5.3, se dispone de un conjunto de datos simultáneos, tanto de los radiómetros de referencia como de los radiómetros de campo. Este conjunto fue utilizado para la obtención del factor de calibración y, para ello, fue necesario obtener valores de irradiancia con unidades radiométricas de  $Wm^{-2}$  en el caso de los radiómetros de referencia para los cuales se conocen las correcciones y factor de calibración. En el caso de los radiómetros SL 501, los valores en MED deben multiplicarse por el valor 0.35 para convertirlos en  $Jm^{-2}$ , de acuerdo a los parámetros constructivos de estos radiómetros. Esto proviene de que  $1\ MED = 210\ J$ , energía acumulada durante 60 s y de la multiplicación  $\times 10$  a la hora de obtener los valores según se explicó en la sección 4. De esta manera, la constante de calibración para los radiómetros SL 501 es adimensional mientras que, para el resto de los radiómetros, la constante se expresa en unidades de  $Wm^{-2}/V$ .

Para cada una de las mediciones obtenidas, es esperable que se cumpla la relación mostrada en (5), la cual se obtiene de establecer que la irradiancia solar eritémica medida por el radiómetro de campo debe ser igual a la medida por el radiómetro de referencia. Lo mismo aplica para la irradiancia UVA.

$$V_{Ri}C_R\text{Coscor}_{Ri}f_{nRi} = V_{Fi}C_F\text{Coscor}_{Fi}f_{nFi} \quad (5)$$

donde  $f_{nFi}$  es la matriz de corrección del radiómetro de campo,  $f_{nRi}$  es la matriz de corrección del radiómetro de referencia,  $\text{Coscor}_{Fi}$  la corrección coseno del radiómetro de campo y  $\text{Coscor}_{Ri}$  la corrección coseno del radiómetro de referencia, todos estos al momento i-esimo.

Utilizando la ecuación (5), es posible obtener N valores del factor de calibración instantáneo del radiómetro de referencia ( $C_{Fi}$ ).

Finalmente, para obtener el factor de calibración del radiómetro de campo se hace un promedio aritmético de los  $C_{Fi}$  (6).

$$C_F = \overline{C_{Fi}} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_i^N \frac{C_R V_{Ri} f_{nRi} \text{Coscor}_{Ri}}{V_{Fi} f_{nFi} \text{Coscor}_{Fi}} \quad (6)$$

#### 5.4.2 Radiómetros YES UVA-1 y EKO UVA

Como se comentó anteriormente, no se conocen las variables  $\text{Coscor}$  y  $f_n$  para los radiómetros YES UVA-1 y EKO UVA, por lo que la metodología a utilizar para la calibración de estos radiómetros se basa en la ecuación (2). En un análisis preliminar, se encontró que los valores de constante de calibración instantánea cuando  $\text{SZA} < 15^\circ$  se mantuvieron muy estables alrededor del valor promedio obtenido para esa condición. Por esta razón, se trabajó con una normalización establecida del parámetro  $B(\text{SZA})$  para las mediciones que cumplieran  $\text{SZA} < 15^\circ$  y, de esa manera, se pudo obtener el factor de calibración de cada radiómetro según se muestra en la ecuación (7).

$$C_F = \overline{C_{Fi}} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_i^N \frac{C_R V_{Ri} f_{nRi} \text{Coscor}_{Ri}}{V_{Fi}} \quad \text{tal que } \text{SZA} \leq 15^\circ \quad (7)$$

Una vez establecido dicho factor constante, se determinaron los valores de  $B(\text{SZA})$  a partir de la ecuación (2) para todos los  $\text{SZA}$  mayores a  $20^\circ$  siguiendo la misma separación del resto de las correcciones, esto es en saltos de  $5^\circ$  en  $\text{SZA}$ . Para cada valor  $\text{SZA}$  múltiplo de 5, se estableció el intervalo  $\text{SZA} \pm 2.5^\circ$ . De esta manera, el valor de  $B$  correspondiente a, por ejemplo,  $\text{SZA} = 20^\circ$ , se obtuvo en base a mediciones que cumplieran el intervalo  $17.5^\circ < \text{SZA} < 22.5^\circ$ . El cálculo de  $B$ , para cada uno de los intervalos de  $\text{SZA}$ , se realizó como un promedio aritmético de los valores instantáneos de  $B$ , de acuerdo con la ecuación (8). Debido a que solo se utilizaron mediciones con  $\text{SZA} < 70^\circ$ , entonces se asoció el valor de  $B$  para  $\text{SZA} = 70^\circ$  a los ángulos mayores a ese valor.

$$B_F = \overline{B_{Fi}} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_i^N \frac{C_R V_{Ri} f_{nRi} \text{Coscor}_{Ri}}{V_{Fi} C_F} \quad (8)$$

## 5.5 Obtención del factor de calibración sin correcciones en radiómetros UVE

Los valores obtenidos al aplicar la ecuación (1) representan la mayor calidad posible cuando se cuenta con las correcciones y constantes de calibración según se desarrolló en las secciones 5.2 y 5.4. Sin embargo, su aplicación en tiempo real puede llegar a ser limitada porque requeriría conocer los valores de ozono que, comúnmente, se obtienen de manera diaria. Ante esto, en esta IC se propuso, también, obtener una constante de calibración que permita obtener estimaciones de irradiancia UVE sin la consideración de las correcciones planteadas en las secciones anteriores. Esto implica la obtención de una constante por la cual multiplicar los valores de salida de los radiómetros para obtener estimaciones puntuales de irradiancia UVE. Para obtener esa constante de calibración sin correcciones se aplicó la ecuación (6) de tal manera que  $f_{nFi}$  y  $Coscor_{Fi}$  tomaran el valor unitario. De esta manera, se obtuvo un factor de calibración diferente al obtenido según la sección 5.4, el cual podrá ser utilizado en tiempo real para obtener estimaciones de irradiancia UVE con una mayor incertidumbre que si se aplicaran todas las correcciones, pero con valores más razonables que si solo se utilizara la constante de calibración obtenida según la sección 5.4 sin el uso de correcciones.

## 6. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES

En esta sección se presentan las consideraciones y metodología para el cálculo de incertidumbres de los radiómetros calibrados durante la presente IC. Debe tenerse en cuenta que, si bien hay algunas similitudes en el análisis de incertidumbre de algunos radiómetros, principalmente en función al sistema de adquisición utilizado, los cálculos realizados se diferencian en algún punto, por lo que el enfoque utilizado para cada tipo de radiómetro se presenta de manera diferenciada en subsecciones.

El análisis de incertidumbres considera todas las posibles fuentes de incertidumbre relacionadas con las diferentes mediciones y parámetros que, de una forma u otra, afectan las mediciones. Durante el análisis de incertidumbres realizado en esta IC se consideraron tanto las incertidumbres de tipo A como las de tipo B. En particular, las consideradas en esta IC están asociadas a la incertidumbre obtenida por el PMOD/WRC en los radiómetros de referencia, la incertidumbre estimada para la adquisición de los valores, la incertidumbre asociada a las funciones respuesta nominales y la incertidumbre obtenida de la dispersión estadística de los datos. Asimismo, se estableció que la covarianza entre las variables es nula, por lo que la incertidumbre estándar de un parámetro “y”, que depende de variables independientes  $x_i$ , se expresa según la ecuación (9). Lo importante a la hora de aplicar la ecuación (9) es determinar la “función modelo” que relaciona el parámetro buscado con las fuentes de incertidumbre conocidas y estimadas.

$$u^2(y) = \sum \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (9)$$

Finalmente, la incertidumbre expandida se obtiene a partir de la incertidumbre estándar multiplicada por un parámetro  $k$ , el cual toma el valor 2 cuando se considera una distribución normal.

Debe tenerse en cuenta que, dado que las correcciones  $Coscor$  y  $f_n$  presentadas en las tablas II a IX fueron obtenidas como promedios para cada tipo de instrumento, son esperables desviaciones de las mismas para cada instrumento individual. Teniendo esto en cuenta, desde el PMOD/WRC se brindaron las correcciones presentadas en la sección 5.2 junto con la incertidumbre expandida de cada uno de los valores. En los

instrumentos de campo para los que se conoce estas correcciones, ya sea de fábrica o por calibraciones anteriores realizadas por el PMOD/WRC, se asoció una incertidumbre relativa y constante del 2% para cada valor teniendo en cuenta que la caracterización obtenida en condiciones de laboratorio años anteriores puede haber sufrido variaciones por el paso del tiempo y por estar a la intemperie (Cede y otros, 2002).

Asimismo, debe tenerse en cuenta que los radiómetros que no regulan temperatura medirán con una mayor incertidumbre que los que se encuentran térmicamente estabilizados. Durante el análisis de los datos obtenidos en esta IC se decidió considerar las variaciones que la no-estabilización de temperatura puede ocasionar en el análisis estadístico en vez de considerar una incertidumbre rectangular. Quienes hagan uso de los datos en adelante podrán asociarle a las mediciones una incertidumbre extra debido a este motivo.

## 6.1 Incertidumbre en radiómetros Kipp&Zonen (UVE y UVA), YES UVB-1 y EKO UVE

Para obtener la incertidumbre final del factor de calibración de los radiómetros K&Z UV-S-E-T, YES UVB-1 y EKO MS-2010D, todos conectados a los *dataloggers* Campbell, primero fue necesario obtener la incertidumbre parcial de cada una de las mediciones de tensión, tanto del radiómetro de referencia como del radiómetro de campo, así como la incertidumbre del factor de calibración del radiómetro de referencia.

A continuación se detallan los cálculos a partir de los cuales se obtuvo la incertidumbre estándar del factor de calibración del radiómetro de referencia y las incertidumbres estándar de adquisición de la tensión de referencia y del radiómetro de campo.

### 6.1.1 Incertidumbre del factor de calibración de radiómetro de referencia ( $C_R$ )

Cuando las condiciones en las que se lleva adelante la calibración son controladas (indoor) entonces algunas incertidumbres establecidas por el fabricante se ven disminuidas para los radiómetros de referencia y los de campo. En cambio, cuando la calibración se lleva adelante bajo condiciones meteorológicas cambiantes, deben considerarse fuentes de incertidumbre asociadas al factor de calibración del radiómetro de referencia. Asimismo, solo es correcto considerar como única fuente de incertidumbre en  $C_R$  la incertidumbre expandida del certificado de calibración cuando las condiciones de calibración son similares a las utilizadas durante su última calibración. Debido a que las calibraciones que realiza el SMN son *outdoor* entonces se consideran todas las fuentes de incertidumbre según la ecuación (10). Las fuentes de incertidumbre consideradas se presentan en la Tabla X. Salvo en la incertidumbre del factor de calibración, que se conoce que es una distribución normal, las contribuciones a la incertidumbre final del factor de calibración del radiómetro de referencia se consideraron rectangulares, por eso se dividen en  $\sqrt{3}$ . No se consideraron en este análisis cuestiones relacionadas con la temperatura ya que la misma se encontraba estabilizada, ni tampoco la no-estabilidad del radiómetro, con un valor de 5% según especificaciones técnicas (ET), debido a que el radiómetro se instaló apenas volvió de Davos.

$$u^2(C_R) = \left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{C_2}{\sqrt{3}} \frac{C_R}{100}\right)^2 + \left(\frac{C_3}{\sqrt{3}} \frac{C_R}{100}\right)^2 \quad (10)$$

**Tabla X.** Fuentes de incertidumbres relacionadas con el factor de calibración del radiómetro de referencia.

Fuente de contribución	Factor de calibración	Respuesta direccional	No-linealidad
Incertidumbre	$\pm C1$ W/m <sup>2</sup> /V	$\pm C2$ %	$\pm C3$ %
<b>K&amp;Z 170213</b>	0.0073	2.5	1

### 6.1.2 Incertidumbre en la medición de la tensión del radiómetro de referencia ( $V_R$ )

La medición de los valores de tensión del radiómetro de referencia se realiza utilizando un sistema de adquisición de datos (DAS por sus siglas en inglés). En el caso del SMN se utiliza un *datalogger* Campbell modelo CR1000X.

Las fuentes de incertidumbre relacionadas con la adquisición del dato de tensión del radiómetro de referencia ( $V_R$ ) se presentan en la Tabla XI. Asimismo, la expresión utilizada para calcular la incertidumbre de las mediciones de tensión del radiómetro de referencia ( $u(V_R)$ ) se presenta en la ecuación (11).

$$u_i^2(V_R) = \left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{C_2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{C_3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{C_4}{2}\right)^2 \quad (11)$$

**Tabla XI.** Fuentes de incertidumbre consideradas para el cálculo de la incertidumbre estándar de las mediciones de voltaje del radiómetro de referencia. CC: certificado de calibración datalogger. ET: especificaciones técnicas. \*Se colocó 5000 mV porque fue el rango utilizado.

Fuente de contribución	Incertidumbre de canal	Incertidumbre en resolución del display	Exactitud del canal	Offset nocturno
Incertidumbre	$\pm C1$ mV	$\pm C2$ mV	$\pm C3$ mV	$\pm C4$ mV
<b>Valor</b>	2	*5000/2 <sup>16+1</sup>	0.04%.V + offset	-

Para el *datalogger* CR1000X y el tipo de configuración utilizado ("Differential with Input Reversal"), el valor de offset es 0.15  $\mu$ V. Asimismo, el valor 16 utilizado para C2 considera la precisión establecida en la línea de programación del *datalogger*, "FP2".

La incertidumbre estándar asociada al valor de *offset* nocturno se obtiene considerando errores tanto del tipo A como del tipo B. En la ecuación (12) se presenta la expresión para obtener el valor de *offset* nocturno correspondiente al día N.

$$V_{R0\ off}^N = \frac{1}{m} \sum_i^m V_{R0\ i} \quad \text{si SZA} > 100^\circ \quad (12)$$

Cada uno de los valores de tensión  $V_{R0\ i}$  de la ecuación (12) tiene asociada su propia incertidumbre, la cual se puede obtener utilizando los primeros tres términos de la ecuación (11). De esta manera, la incertidumbre estándar asociada a cada uno de los valores de offset nocturno para cada día se obtiene según la ecuación (13) donde  $\sigma(V_{R0\ i})$  denota la desviación estándar obtenida a partir de la dispersión de datos de tensión nocturna correspondiente a cada día. Se obtiene un  $u^2(V_{R0\ off}^N)$  para cada día, por lo que los valores de tensión de un determinado día tendrán el mismo valor de incertidumbre de *offset* nocturno.

$$u^2(V_{R0\ off}^N) = \left( \frac{U(V_{R0\ i})}{2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(V_{R0\ i})}{\sqrt{m}} \right)^2 \quad (13)$$

### 6.1.3 Incertidumbre en la medición de la tensión del radiómetro de campo ( $V_F$ )

La medición de los valores de tensión del radiómetro de campo se realiza utilizando el mismo sistema de adquisición de datos en el que se encuentra instalado el radiómetro de referencia. Por ello, el procedimiento para analizar cada una de las fuentes de incertidumbre asociadas a la adquisición del dato de tensión del radiómetro de campo ( $V_F$ ) es el mismo que el presentado para el radiómetro de referencia en la sección 6.1.2. Así, tanto el análisis de *offset* nocturno como las ecuaciones planteadas en esa sección son aplicables para obtener los valores de incertidumbre estándar en las mediciones de tensión del radiómetro de campo ( $u(V_F)$ ).

### 6.1.4 Cálculo final de la incertidumbre

Conociendo las incertidumbres estándar parciales de cada una de las fuentes de incertidumbres, según lo desarrollado en las secciones 6.1.1 a 6.1.3, lo que sigue para obtener la incertidumbre estándar del factor de calibración de cada radiómetro es aplicar la ecuación (9). En dicha ecuación se establece la necesidad de conocer la función modelo que relaciona las variables que aportan incertidumbre con el parámetro que se desea obtener, el factor de calibración en este caso.

La función modelo a partir de la cual se puede obtener el factor de calibración está expresada en la ecuación (6). A partir de esta, es posible obtener la incertidumbre estándar del factor de calibración instantáneo ( $u^2(C_{Fi})$ ) en base al aporte de cada una de las incertidumbres según la ecuación (14).

$$u^2(C_{Fi}) = \sum \left( \frac{\partial C_{Fi}}{\partial C_R} \right)^2 \frac{U^2(C_R)}{2^2} + \sum \left( \frac{\partial C_{Fi}}{\partial V_{Ri}} \right)^2 \frac{U^2(V_{Ri})}{2^2} + \sum \left( \frac{\partial C_{Fi}}{\partial V_{Fi}} \right)^2 \frac{U^2(V_{Fi})}{2^2} + \sum \left( \frac{\partial C_{Fi}}{\partial C_{oscor_{Fi}}} \right)^2 \frac{U^2(C_{oscor_{Fi}})}{2^2} + \quad (14)$$

$$+ \sum \left( \frac{\partial C_{Fi}}{\partial f_{nFi}} \right)^2 \frac{U^2(f_{nFi})}{2^2}$$

Una vez conocida la incertidumbre de cada factor instantáneo, se puede obtener la incertidumbre estándar final del factor de calibración final ( $u^2(C_F)$ ) siguiendo la ecuación (15).

$$u^2(C_F) = \left( \frac{U(C_{Fi})}{2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(C_{Fi})}{\sqrt{N}} \right)^2 \quad (15)$$

El segundo término de la ecuación (15) se asocia a la dispersión estadística de los valores de factor de calibración instantáneos.

En las ecuaciones (16) a (20) se presentan las expresiones de los términos individuales de la ecuación (14).

$$\frac{\partial C_{Fi}}{\partial C_R} = \frac{V_{Ri} f_{nRi} \text{Coscor}_{Ri}}{V_{Fi} \text{Coscor}_{Fi} f_{nFi}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial C_{Fi}}{\partial V_{Ri}} = \frac{C_R f_{nRi} \text{Coscor}_{Ri}}{V_{Fi} \text{Coscor}_{Fi} f_{nFi}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_{Fi}}{\partial V_{Fi}} = \frac{-C_R V_{Ri} \text{Coscor}_{Ri} f_{nRi}}{V_{Fi}^2 \text{Coscor}_{Fi} f_{nFi}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_{Fi}}{\partial \text{Coscor}_{Fi}} = \frac{-C_R V_{Ri} \text{Coscor}_{Ri} f_{nRi}}{V_{Fi} \text{Coscor}_{Fi}^2 f_{nFi}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_{Fi}}{\partial f_{nFi}} = \frac{-C_R V_{Ri} \text{Coscor}_{Ri} f_{nRi}}{V_{Fi} \text{Coscor}_{Fi} f_{nFi}^2} \quad (20)$$

Una manera más sencilla de realizar los cálculos consiste en notar que, como las variables de la ecuación (6) se relacionan de manera multiplicativa, entonces puede utilizarse que la incertidumbre relativa del factor instantáneo es la suma de las incertidumbres relativas de las variables según la ecuación (21).

$$\begin{aligned}
 u^2(C_{Fi}) = & \left( \frac{u(V_{Ri})}{V_{Ri}} \right)^2 + \left( \frac{u(V_{Fi})}{V_{Fi}} \right)^2 + \left( \frac{u(C_R)}{C_R} \right)^2 + \\
 & \left( \frac{u(Coscor_{Fi})}{Coscor_{Fi}} \right)^2 + \left( \frac{u(f_{nFi})}{f_{nFi}} \right)^2
 \end{aligned} \tag{21}$$

## 6.2 Incertidumbre en radiómetros YES UVA-1 y EKO UVA

Para el análisis de incertidumbres de los radiómetros YES UVA-1 y EKO UVA, los cuales estuvieron conectados a los *dataloggers* Campbell, se siguió un enfoque similar al propuesto en las secciones 6.1.1 al 6.1.3 con la finalidad de obtener las incertidumbres estándar parciales de las mediciones de voltaje, tanto del radiómetro de referencia como de los radiómetros de campo, y también del factor de calibración del radiómetro de referencia. Conociendo estas incertidumbres parciales fue posible obtener la incertidumbre estándar del factor de calibración ( $u^2(C_F)$ ) siguiendo la metodología desarrollada en la sección 6.1.4.

Una vez establecida  $u^2(C_F)$  fue posible evaluar y obtener la incertidumbre de los valores de  $B_{Fi}$  en cada intervalo de SZA,  $u^2(B_{Fi})$ , a partir del desarrollo en derivadas parciales de la función modelo expresada en la ecuación (8). Como cada valor de  $B_{Fi}$  se obtiene de manera multiplicativa, entonces su incertidumbre estándar relativa se obtiene como la suma de las incertidumbres relativas de todos los parámetros que aportan a la incertidumbre. Se aclara que  $u^2(C_F)$  también fue considerada a la hora de evaluar  $u^2(B_{Fi})$ .

Finalmente, la incertidumbre estándar de  $B_F$  para cada intervalo se obtiene mediante la ecuación (22).

$$u^2(B_F) = \left( \frac{U(B_{Fi})}{2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma(B_{Fi})}{\sqrt{N}} \right)^2 \tag{22}$$

De esta manera, se obtuvo un valor de  $B_F$  para cada intervalo de SZA y su incertidumbre expandida asociada.

## 6.3 Incertidumbre en radiómetros SL 501

Debido a la poca información que el fabricante entrega para los instrumentos SL 501 en relación a las incertidumbres, durante esta IC se optó por utilizar los resultados obtenidos por Cede y otros (2002). Si bien múltiples fuentes de incertidumbre fueron evaluadas en ese trabajo, en el análisis actual únicamente se consideró la incertidumbre de la señal cruda del instrumento (incertidumbre de tipo B, según los autores), la cual alcanza un valor de 0.9% para SZA= 70°. Este fue el valor de incertidumbre relativa asociado a cada una de las mediciones crudas de los radiómetros SL 501, tanto de referencia como de campo debido a que se consideraron, para los cálculos, mediciones que tuvieran SZA menores a ese valor.

Una vez establecida la incertidumbre de cada medición, los cálculos siguen los lineamientos establecidos en las secciones 6.1.1 a 6.1.4, con algunas pequeñas consideraciones que se alinean con diferencias menores.



En el caso de la incertidumbre del factor de calibración del radiómetro de referencia, únicamente se considera la incertidumbre expresada en el certificado de calibración ya que no se cuenta con información del fabricante que permita cuantificar otras fuentes de incertidumbre que afecten la sensibilidad del instrumento. Asimismo, como se comentó se considerará un valor de incertidumbre relativa de las mediciones del 0.9%, por lo que dicho valor deberá considerarse a la hora de establecer el valor final que considera el offset nocturno según las Ecuaciones 3 y 4. Finalmente, las ecuaciones de la sección 6.1.4 fueron aplicadas para obtener la incertidumbre expandida de cada radiómetro de campo SL 501.

## 6.4 Incertidumbre del factor de calibración sin correcciones

Para el análisis de incertidumbres a la hora de obtener el factor de calibración sin correcciones explicado en la sección 5.5 se siguió el planteo desarrollado en las secciones 6.1.1 a 6.1.3 en el caso de radiómetros analógicos. A su vez, en el caso de los radiómetros digitales SL 501, se utilizó la incertidumbre de cada medición y del factor de calibración del radiómetro de referencia tal como se explica en la sección 6.3. Una vez obtenidas las incertidumbres de las mediciones y de los factores de calibración de los radiómetros de referencia, se decidió cuantificar aquella aportada por la ausencia de correcciones en base a los resultados obtenidos por Hülsen y Gröbner (2017) para los radiómetros UVE. En ese reporte, los autores encontraron diferencias de hasta 20% en los radiómetros K&Z y 10% en los radiómetros YES y SL al no utilizar la corrección  $f_n$ . Por otra parte, diferencias de 3% fueron halladas en los radiómetros K&Z, 6% en los radiómetros SL y 10% en los radiómetros YES cuando no se utilizó la corrección *Coscor*.

Basándonos en los resultados obtenidos por Hülsen y Gröbner (2017), se utilizaron esos valores porcentuales como la incertidumbre, con distribución rectangular, que aporta la ausencia de correcciones tanto en  $f_n$  como en *Coscor* para los radiómetros nombrados. En el caso del radiómetro EKO UVE, para el cual no se conocen esas desviaciones, se estableció el escenario más desfavorable de 20% en  $f_n$  y 10% en *Coscor*.

## 7. RESULTADOS

En esta IC se calibraron 25 de los 26 radiómetros que participaron de la misma. El radiómetro YES120214-3 no se pudo calibrar por problemas en la señal de salida.

En la Tabla XII se presentan los resultados obtenidos para cada sensor. Asimismo, en esta tabla se presenta la incertidumbre expandida de los factores de calibración obtenidos considerando un factor de cobertura  $k=2$ , obteniendo así un intervalo de confianza del 95% para una distribución normal.

**Tabla XII.** Resultados de la IC UV 2022. Se presenta el factor de calibración obtenido con y sin correcciones, la incertidumbre expandida y el último factor de calibración conocido para cada radiómetro. Las filas de color salmon representan instrumentos que miden UVA, las de color verde los que miden UVE de manera analógica y las restantes filas corresponden a los radiómetros SL.

SENSOR (S/N)	UBICACIÓN	FACTOR ANTERIOR	C (2022)	U (2022)	INCERT. RELAT (%)	CANT. DATOS	C SIN CORR ECCIONES	U SIN CORRECCIONES	
120214-1	BARILOCHE	22.35	20.76	0.99	4.8	3737			Wm <sup>2</sup> /V
60428-2	NEUQUEN	20.20	22.0	1.0	4.8	3202			Wm <sup>2</sup> /V
170144	PILAR	30.584	24.7	1.4	5.7	61212			Wm <sup>2</sup> /V
120214-2	RIO GALLEGOS	22.38	20.05	0.95	4.8	3248			Wm <sup>2</sup> /V
100013	SALTO (URUGUAY)	26.51	46.2	2.7	5.8	11745			Wm <sup>2</sup> /V
S99014.06	TANDIL	11644.99	31500	2400	7.6	4355			Wm <sup>2</sup> /V

120214-4	VILLA MARTELLI	22.21	20.92	0.99	4.8	4896			Wm <sup>2</sup> /V
130805	BARILOCHE	0.12	0.1250	0.0086	6.9	59074	0.144	0.025	Wm <sup>2</sup> /V
90703	BACK UP CITEDEF	0.1305	0.1342	0.0082	6.1	57624	0.152	0.026	Wm <sup>2</sup> /V
130803	COM. RIVADAVIA	0.12	0.1194	0.0080	6.7	66509	0.138	0.024	Wm <sup>2</sup> /V
970811	CORDOBA (UNC)	0.13	0.1334	0.0091	6.8	46507	0.154	0.026	Wm <sup>2</sup> /V
940602	LA QUIACA	0.12	0.1287	0.0089	6.9	35507	0.147	0.025	Wm <sup>2</sup> /V
60703	NEUQUEN	0.13	0.1326	0.0091	6.8	35253	0.153	0.026	Wm <sup>2</sup> /V
170212	PILAR	0.17	0.871	0.049	5.6	61101	0.177	0.042	Wm <sup>2</sup> /V
130806	RIO GALLEGOS	0.12	0.1239	0.0085	6.9	55044	0.142	0.024	Wm <sup>2</sup> /V
120059	SALTA (UNSa)	0.15	0.173	0.013	7.7	44581	0.173	0.041	Wm <sup>2</sup> /V
100013	SALTO (URUGUAY)	0.1496	0.214	0.013	6.1	11806	0.216	0.052	Wm <sup>2</sup> /V
130804	VILLA MARTELLI	0.13	0.149	0.010	6.8	50092	0.171	0.029	Wm <sup>2</sup> /V
S97088.02	TANDIL	127.42763	165	28	16.8	43846	167	59	Wm <sup>2</sup> /V
1866	USHUAIA	1.17	1.13	0.13	11.8	3793	1.19	0.17	
1870	MENDOZA	1.05	1.05	0.12	11.6	3960	1.11	0.15	
2747	BUENOS AIRES	1.34	1.26	0.15	11.7	692	1.35	0.19	
2748	-	1.76	1.98	0.24	12.0	3070	2.10	0.29	
2753	-	1.15	1.09	0.13	12.0	2201	1.15	0.16	
9004	-	0.92	0.89	0.11	12.2	3814	0.94	0.13	
1871	-	0.97	0.97	0.12	11.9	846	1.05	0.15	

En la Tabla XII también se presenta el factor de calibración utilizado hasta esta IC para cada radiómetro, los cuales fueron obtenidos en fábrica, por el PMOD/WRC o en intercomparaciones anteriores (Nollas y otros, 2019). Debe aclararse que no es posible hacer una comparación directa entre los factores de calibración hallados durante la IC realizada en 2018 y la presentada en este informe debido a que se utilizaron correcciones diferentes en cada una. Una recalibración de los radiómetros calibrados en 2018 debería ser realizada utilizando las correcciones presentadas en este informe para poder hacer una comparación directa. Sin embargo, una comparación entre ambos factores posibilita detectar radiómetros con una deriva que haga sospechar que su funcionamiento ya no sea adecuado, como es el caso del SL2748. La variación observada en el factor de calibración del radiómetro EKO UVA S99014.06 es muy elevada, aunque debe tenerse en cuenta que el factor anterior es el obtenido en fábrica en el año 2010. Por ello, se recomienda su re-calibración con mayor frecuencia a fin de determinar si el radiómetro presenta un comportamiento inestable o deriva en su constante de calibración. También presenta una considerable variación en sus factores de calibración el radiómetro K&Z 100013, tanto para UVA como UVE, respecto a su última calibración la cual fue realizada por el PMOD/WRC en el año 2014. Este caso fue analizado con más detenimiento ya que ambos parámetros son obtenidos por el mismo instrumento. Se encontró que las correcciones obtenidas en laboratorio para el radiómetro no distan demasiado a las estándar brindadas por el PMOD/WRC, por lo que las diferencias entre los factores de calibración podrían estar relacionadas al propio desgaste del instrumento. El resto de los radiómetros no cambió de manera drástica su factor de calibración.

Se observa que la incertidumbre relativa del factor de calibración que considera correcciones en los radiómetros SL no dista mucho de la obtenida sin correcciones. Esto es debido a que, en el proceso de obtención de las incertidumbres de las correcciones, se presentó una gran variabilidad aún dentro del mismo modelo, por lo que esas diferencias incrementaron la incertidumbre. En el resto de los radiómetros, la incertidumbre del factor de calibración obtenida utilizando correcciones es considerablemente menor que sin las mismas, por lo que es recomendable su uso para aplicaciones científicas.

El caso del radiómetro K&Z 170212 se diferencia del resto en cuanto a que no se obtuvo un factor de calibración sino una corrección por la cual multiplicar los valores corregidos con la matriz de fábrica. De hecho, diferentes interpretaciones de la matriz de corrección para este radiómetro hacen que, a pesar de obtener resultados similares entre la constante hallada en 2018 y la obtenida sin el uso de correcciones en 2022,

dichos valores no sean comparables. Se recomienda un reprocesamiento de los valores obtenidos en el 2018 con la finalidad de obtener un factor de calibración que permita reelaborar la serie de datos desde 2018 hasta 2022.

En las Tablas XIII a XVII se presentan los valores de  $B$ , su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados para obtener esos valores en función de SZA para los 4 radiómetros YES UVA-1 y el radiómetro EKO UVA.

**Tabla XIII.** Valores de corrección  $B$  en función de SZA, su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados en su obtención para el radiómetro YES 120214-1.

SZA	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	>70
$B$	1.013	1.026	1.044	1.067	1.098	1.133	1.173	1.218	1.274	1.324	1.354
$U$	0.068	0.069	0.070	0.072	0.075	0.076	0.079	0.082	0.086	0.089	0.091
$N$	6974	5928	4427	5105	5028	4645	5162	5841	5105	3853	1464

**Tabla XIV.** Valores de corrección  $B$  en función de SZA, su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados en su obtención para el radiómetro YES 60428-2.

SZA	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	>70
$B$	1.013	1.023	1.038	1.062	1.100	1.126	1.168	1.220	1.296	1.352	1.387
$U$	0.068	0.069	0.070	0.071	0.075	0.076	0.078	0.082	0.088	0.091	0.094
$N$	4626	4215	3817	4584	4429	4056	4576	5258	4520	3453	1307

**Tabla XIV.** Valores de corrección  $B$  en función de SZA, su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados en su obtención para el radiómetro YES 120214-2.

SZA	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	>70
$B$	1.014	1.027	1.043	1.075	1.101	1.131	1.168	1.212	1.267	1.314	1.344
$U$	0.068	0.069	0.070	0.075	0.079	0.076	0.078	0.081	0.085	0.088	0.090
$N$	5272	4824	4427	4860	4997	4645	5044	5547	4813	3631	1464

**Tabla XIV.** Valores de corrección  $B$  en función de SZA, su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados en su obtención para el radiómetro YES 120214-4.

SZA	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	>70
$B$	1.019	1.034	1.056	1.087	1.128	1.175	1.234	1.304	1.380	1.442	1.468
$U$	0.068	0.069	0.071	0.073	0.076	0.079	0.083	0.088	0.094	0.097	0.099
$N$	6974	6275	5340	6593	6363	6130	6630	6305	5105	3853	1464

**Tabla XIV.** Valores de corrección  $B$  en función de SZA, su incertidumbre expandida ( $U$ ) y la cantidad de datos utilizados en su obtención para el radiómetro EKO S99014.06.

SZA	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	>70
$B$	1.01	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.00
$U$	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.13	0.14	0.16	0.18	0.21	0.26
$N$	5128	4560	4340	4860	4853	4405	4996	5547	4656	3452	1464

Es importante notar que los valores de incertidumbre para los  $B(SZA)$  tienen un valor relativo muy similar para todos los rangos de SZA y es porque, más allá de la dispersión estadística, el término más dominante en el análisis de incertidumbres es el asociado con el factor de calibración del radiómetro de referencia sumado a la incertidumbre del factor de calibración del radiómetro calibrado obtenido durante el análisis. La excepción a esto se observa en el radiómetro EKO UVA y es debido a la elevada incertidumbre relativa de las mediciones de voltaje que arroja dicho instrumento.

Se observa que de los 7 radiómetros SL, 5 de ellos no estabilizan temperatura por lo que, en caso de ser utilizados, debe ser tenida en cuenta la corrección proporcionada por la fábrica.

Una vez obtenido el factor de calibración para cada uno de los sensores, se aplicaron las ecuaciones (1) y (2) con sus respectivas correcciones a cada uno de ellos y se obtuvieron los gráficos que se muestran en los anexos A y B. Las diferencias que se observan en los gráficos entre algunos de los radiómetros de campo y su respectiva referencia se deben a que las correcciones utilizadas para los radiómetros no corresponden a la específica de cada instrumento. Sin embargo, se desprende que todos los sensores miden adecuadamente y dentro del rango de incertidumbres obtenido en el presente análisis.

## 8. CONCLUSIONES

En este informe se presentan los procedimientos y resultados de la IC de radiómetros UVE y UVA realizada desde el 8 de noviembre de 2022 al 15 de diciembre de 2022. En esta IC participaron 26 radiómetros de campo pertenecientes a diferentes instituciones tanto nacionales como regionales, los cuales fueron calibrados utilizando radiómetros calibrados en Davos durante 2022. Para cada uno de los radiómetros calibrados, se obtuvo su factor de calibración y la incertidumbre expandida del mismo.

Debido a que no se cuenta con la infraestructura para realizar una caracterización espectral y angular de los radiómetros, durante el análisis de datos para obtener el factor de calibración de cada radiómetro se utilizaron correcciones estándar promedio, las cuales fueron brindadas por personal del PMOD/WRC para la mayoría de los modelos participantes en esta IC. La excepción al uso de estas correcciones se presentó en los radiómetros para los cuales se dispone de alguna calibración anterior, tanto en fábrica como en Davos por el PMOD/WRC. Un análisis detallado de incertidumbres es presentado en este trabajo, el cual contempló múltiples fuentes que aportaron a la incertidumbre final de cada radiómetro. Se obtuvieron incertidumbres relativas para los radiómetros que van desde 5% hasta casi 17%.

Además de obtener el factor de calibración para los radiómetros UVE utilizando las correcciones estándar, se realizaron cálculos para hallar un factor de calibración, con su incertidumbre, que no considere el uso de correcciones, con la finalidad de contar con un valor que permita estimar la irradiancia eritémica para disponer de información en tiempo real. En dichos factores se obtuvieron incertidumbres relativas que van desde 14% hasta 36%.

En el caso de los radiómetros UVA para los que no se dispuso de correcciones estándar en función de SZA, se realizó un análisis para obtener un factor de corrección que dependa de SZA junto con su incertidumbre.

En cuanto al análisis y detección de momentos de cielo claro, se encontró que el uso de la propuesta realizada por Reno y Hansen (2016) fue adecuada y permitió identificar de manera satisfactoria este tipo de condiciones meteorológicas.

Muchos de los radiómetros que participaron en esta IC no habían sido calibrados desde su puesta en operación, por lo que disponían del factor obtenido en fábrica. Tal es el caso de todos los radiómetros UVA, los cuales variaron su constante de calibración entre  $\pm 10\%$  respecto al factor anterior para los YES UVA-1. Los radiómetros EKO cambiaron considerablemente su constante respecto a la calibración de fábrica, tanto para UVE como UVA, siendo 29% y 170% respectivamente. Las constantes de calibración obtenidas para el radiómetro K&Z 100013 también mostraron un gran cambio respecto a su última calibración, la cual fue realizada por el PMOD/WRC. Para este radiómetro se encontraron variaciones de 43% y 74% para UVE y UVA respectivamente.

Los resultados obtenidos para los radiómetros UVE en esta IC no son directamente comparables con los obtenidos en la IC realizada en 2018 (Nollas y otros, 2019) debido a que las correcciones fueron diferentes. Sin embargo, no parece haber grandes diferencias que hagan sospechar un mal funcionamiento a excepción del SL2748, el cual presenta una deriva creciente en las últimas calibraciones por lo que dicho radiómetro ha sido dado de baja.

Debido a la trazabilidad al PMOD/WRC con la que contaron los radiómetros de referencia en esta IC, todos los radiómetros de campo calibrados con ellos obtendrán ahora mediciones confiables a nivel científico.

## 9. REFERENCIAS

Cede, A., E. Luccini, R.D. Piacentini, L. Nunez, and M. Blumthaler, 2002: Calibration and Uncertainty Estimation of Erythemal Radiometers in the Argentine Ultraviolet Network. *Appl. Opt.*, 41, 6341–6350.

Gschwind B., Wald L., Blanc P., Lefèvre M., Schroedter-Homscheidt M. y A. Arola, “Improving the McClear model estimating the downwelling solar radiation at ground level in cloud-free conditions–McClear-v3,” *Meteorol. Z.* 28, 147–163 (2019). <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0946>

Hülsen G., Gröbner J., 2007: Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance. *Appl. Optics* 46, 5877-5886.

Hülsen G. y Gröbner J., 2017: Report of the 2<sup>nd</sup> International UV filter Radiometer Comparison UVC-II. Davos, Switzerland 25 May to 5 October 2017. [http://projects.pmodwrc.ch/bb2017/media/UVC-II\\_report.pdf](http://projects.pmodwrc.ch/bb2017/media/UVC-II_report.pdf)

Hülsen G. y Gröbner J., 2023: Report of the Third International Solar UV Radiometer Calibration Campaign (UVC-III). GAW Report No. 284.

Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., and Morcrette, J.-J.: McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2403–2418, <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>, 2013.

Lusi A., Orte F., Alonso Suarez R., D’Elia R., Wolfram E., Evaluación de los modelos de radiación solar global Heliosat-4 y McClear en dos sitios de argentina. Vol. 34 Núm. 3 (2023): *Anales AFA*. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.3.76>

Mckinley AF, Diffey BL., 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. En: Passchier WR, Bosjanokovic BFM (Eds), *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*. Elsevier, Amsterdam. 83-7.

Nollas F., Luccini E., Carbajal G., Orte P., Wolfram E., Hülsen G., Gröbner J.. Report of the Fifth Erythemal UV Radiometers Intercomparison (Buenos Aires, Argentina, 2018). GAW report No.243, May 2019 [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=20791#.XN6kuyBKgdV](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20791#.XN6kuyBKgdV)



Orte F., Wolfram E., Luccini E., D' Elia R., Lusi A., Pallota J., Nollas F., Carmona F., Papandrea S., Cabezas M., Carbajal Benítez G., Mizuno A., (2021). Saver-Net UV-total solar irradiance monitoring network in Argentina. *Revista Meteorológica, Argentina*, 47(2), e016, julio-diciembre 2022; ISSN 1850-468X <http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2022/09/orte.pdf>

Reda y Andreas, Solar position algorithm for solar radiation applications, *Solar Energy*. 76 (2004) 577–589. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>.

Reda y Andreas, Corrigendum to "Solar position algorithm for solar radiation applications" [*Solar Energy* 76 (2004) 577-589], *Solar Energy*. 81 (2007) 838. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.01.003>.

Reno, M. J., y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renewable Energy*, 90, 520–531. doi:10.1016/j.renene.2015.12.031

World Health Organization, 2002. Índice UV solar mundial: guía práctica (No. WHO/SDE/OEH/02.2). Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42633>



Personal de diversas instituciones que participaron en conjunto de esta intercomparación.

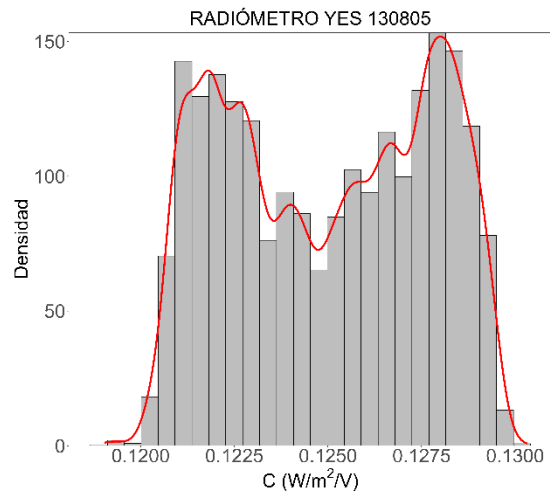
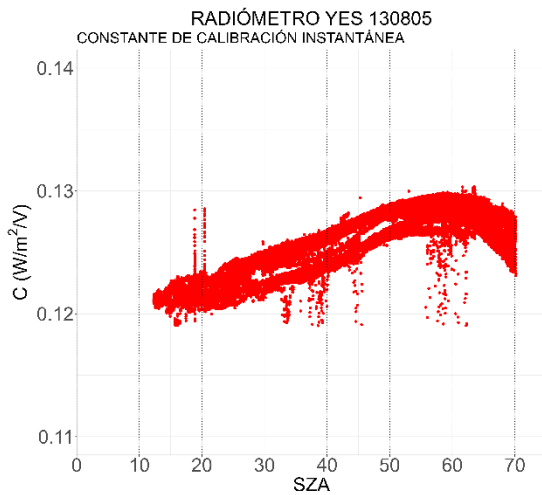
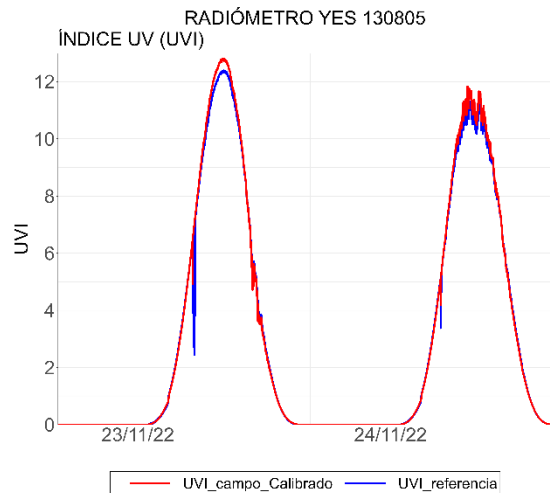
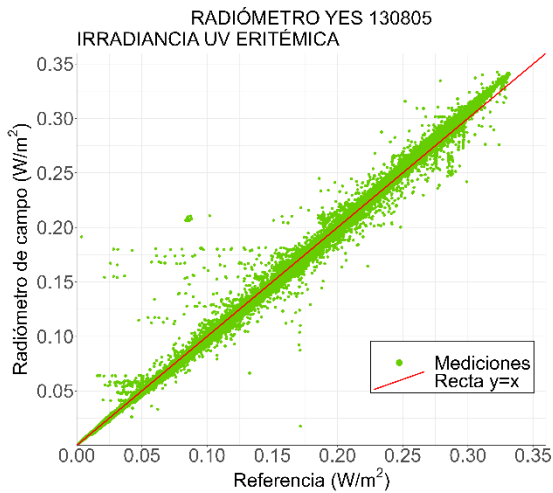
De izquierda a derecha: Anabela Lusi (CONICET), Fernando Nollas (SMN), Julian Lell (SMN-Gersolar), Ernesto Marchesoni (INUMET- Uruguay), Rodrigo Alonso Suarez (LES-Uruguay), Sebastian Papandrea (SMN) y Pablo Facundo Orte (CITEDEF).

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo continuo y profesional brindado por personal del PMOD/WRC, quienes calibraron los radiómetros y brindaron asesoramiento continuo durante esta intercomparación. Se agradece al Mincyt ya que gracias al proyecto PITES N 14 (“Desarrollo de infraestructura, capacidades de calibración y producción de instrumental destinados a la medición de energía solar a nivel nacional”) se pudo financiar la adquisición de dataloggers que fueron utilizados durante este evento. Se agradece también a JICA-Japón, ya que muchos de los radiómetros calibrados durante esta IC fueron aportados por dicha institución en el marco del proyecto SAVER-NET.

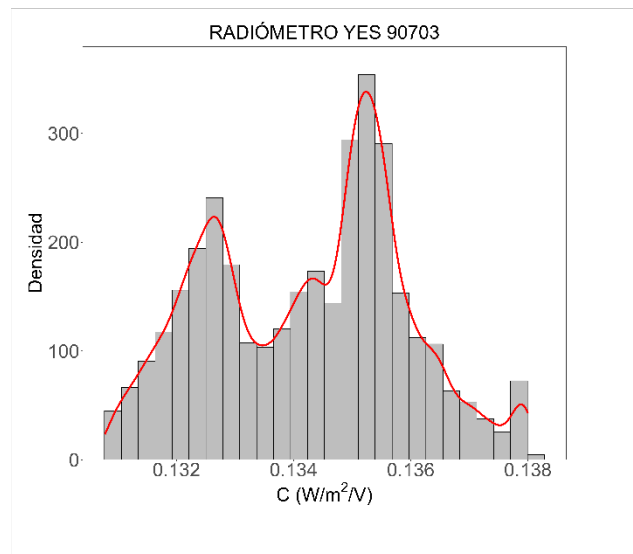
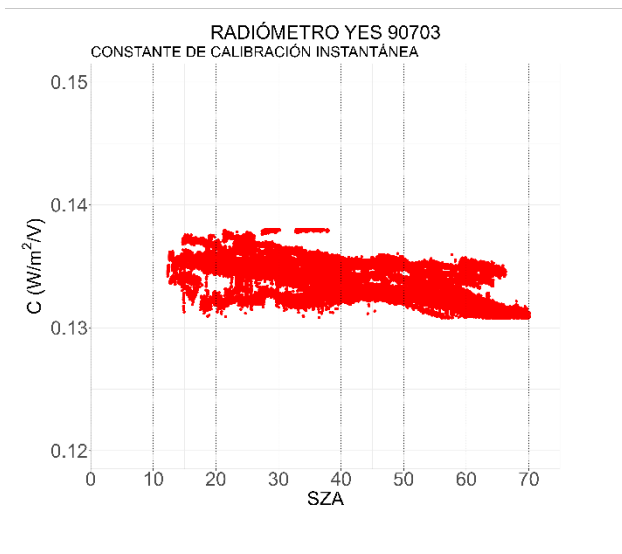
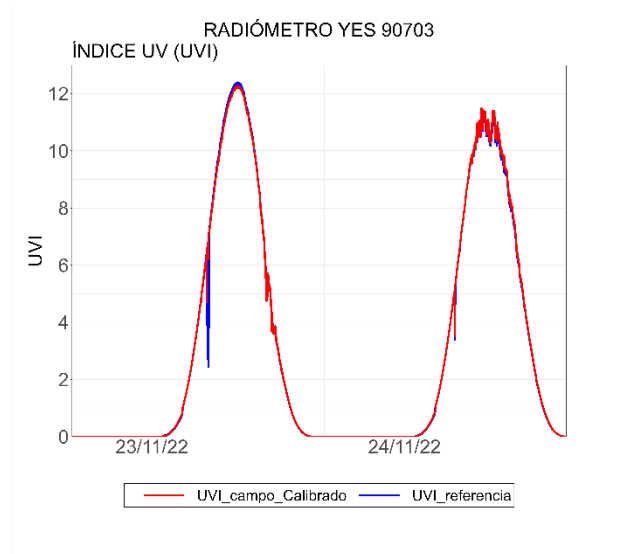
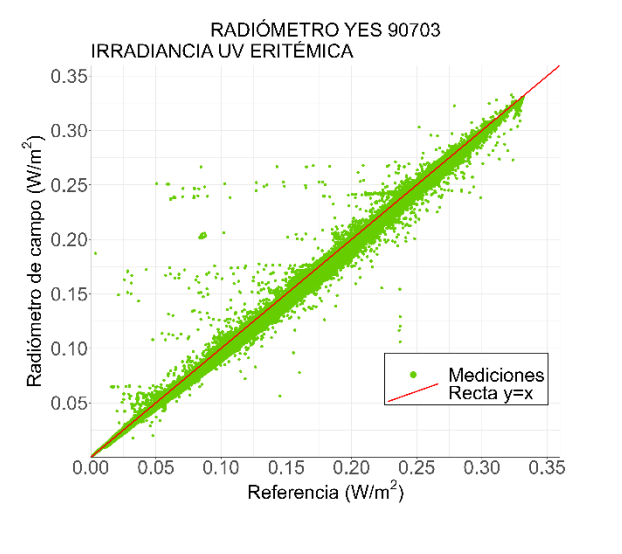
## APÉNDICE A: Resultados radiómetros UVE

### RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 130805

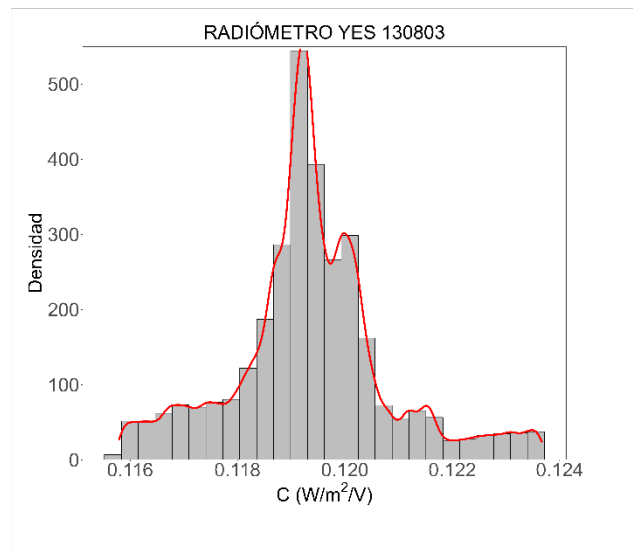
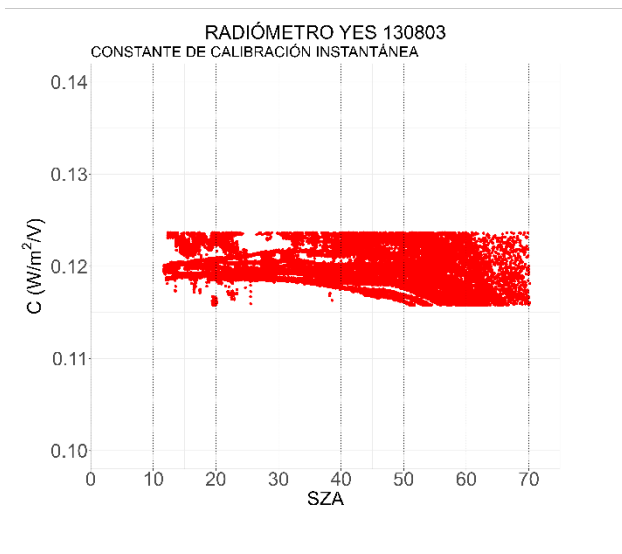
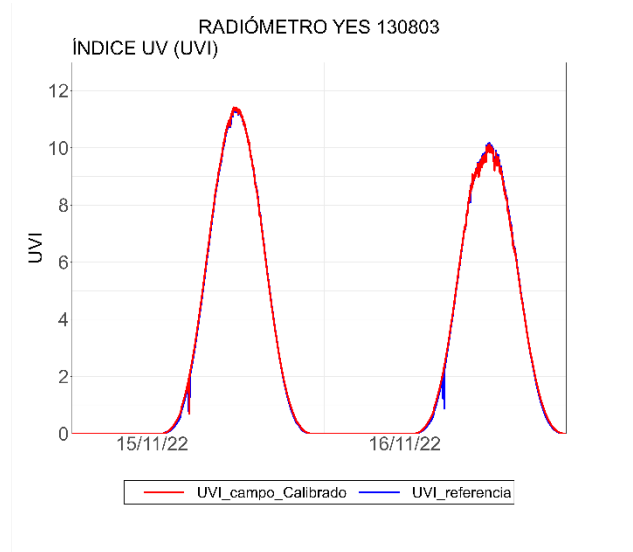
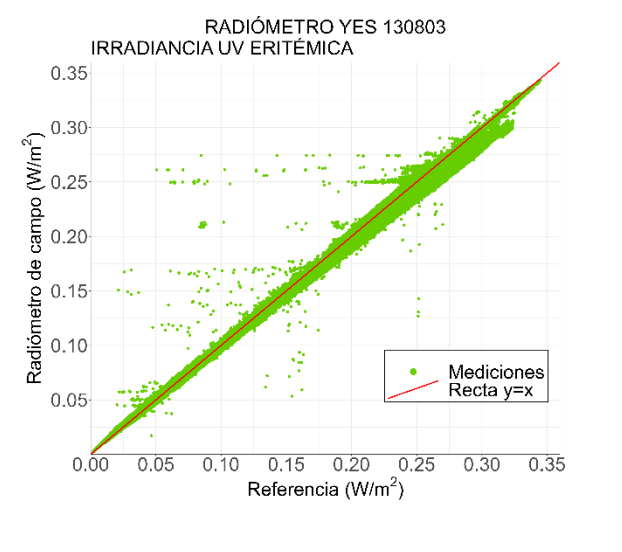




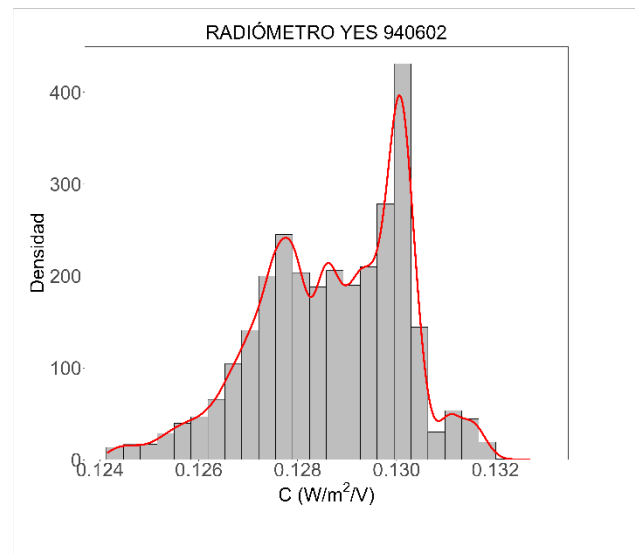
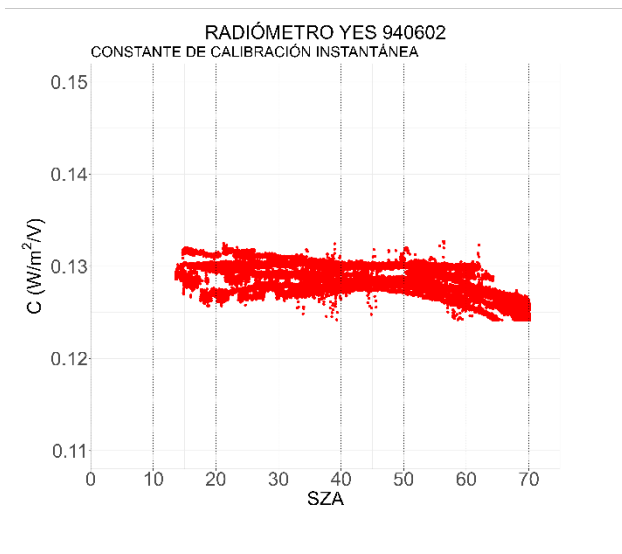
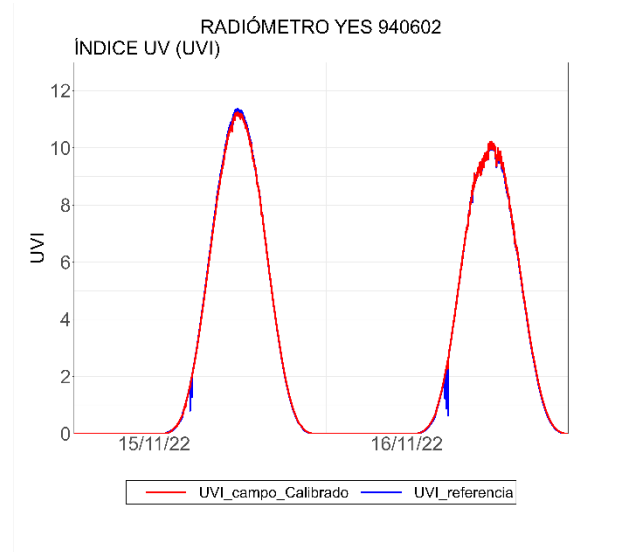
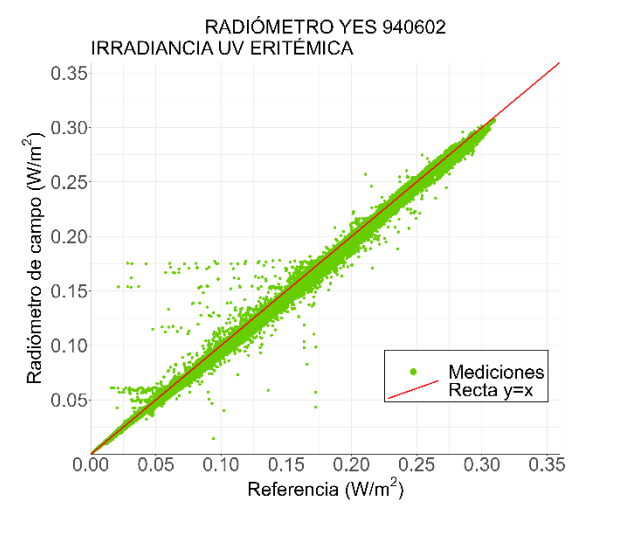
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 90703



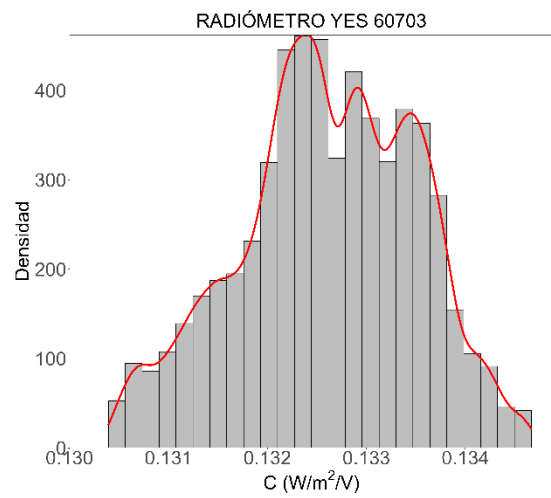
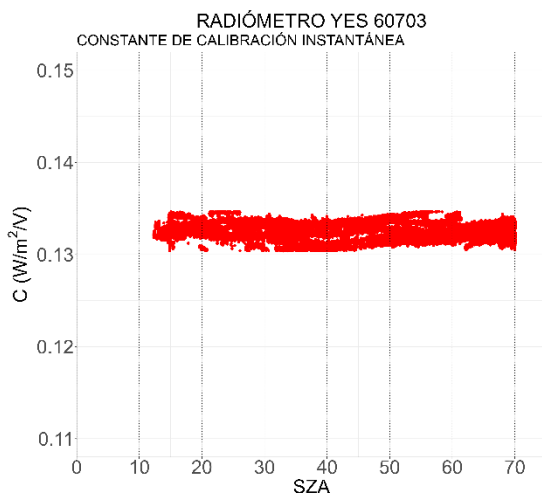
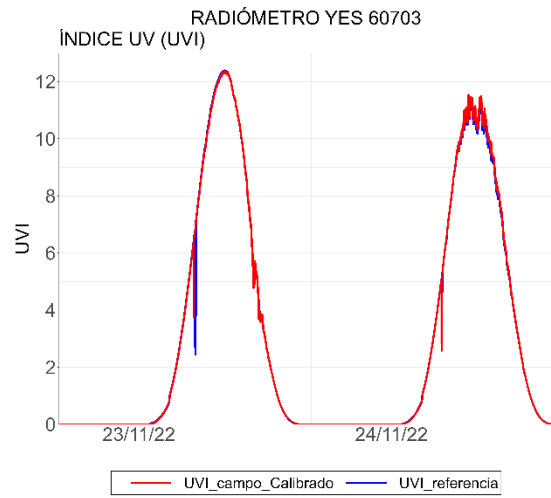
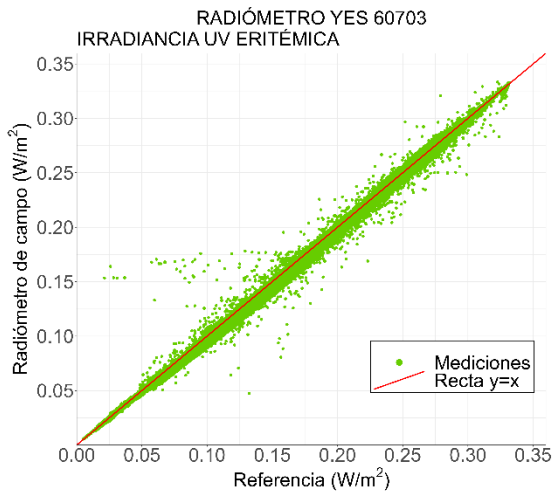
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 130803



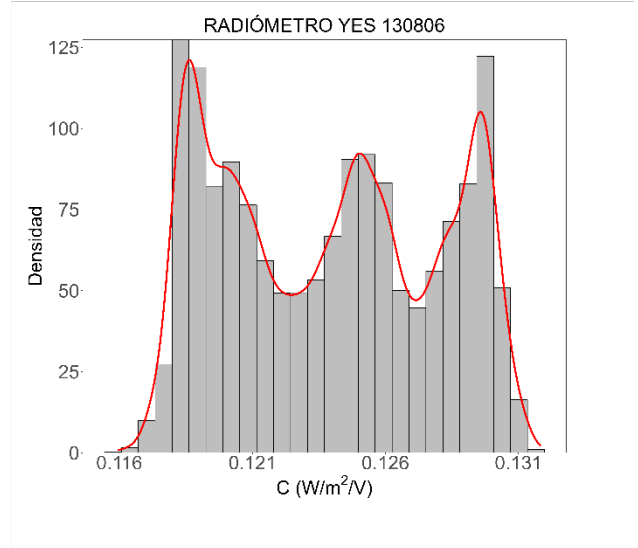
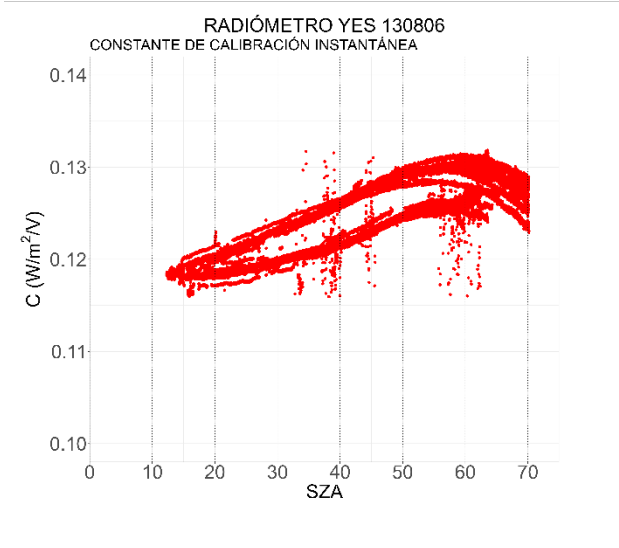
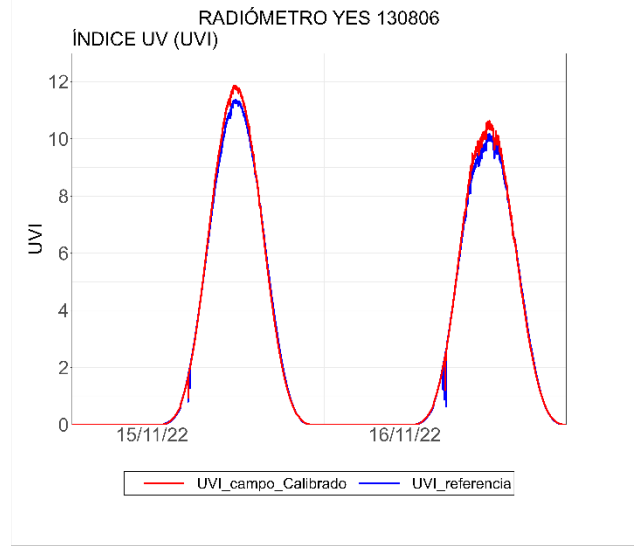
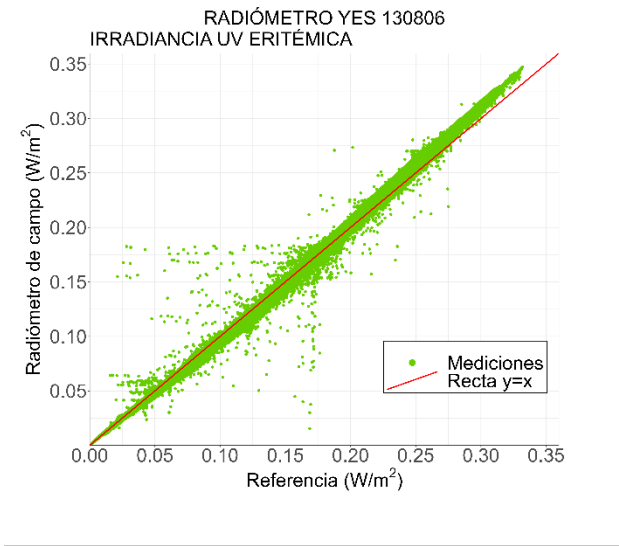
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 940602



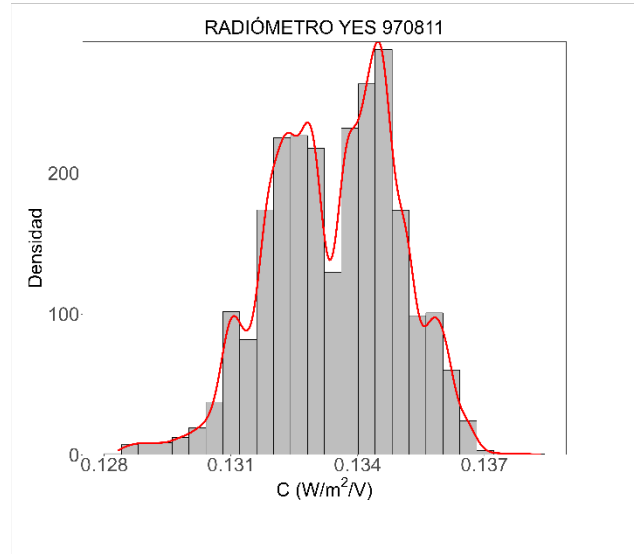
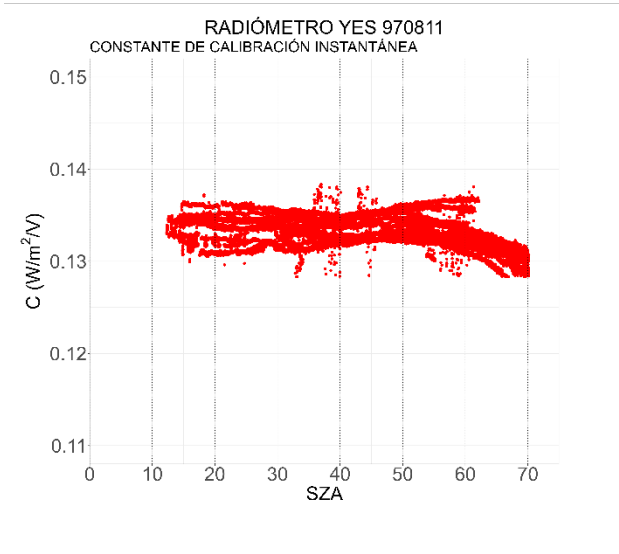
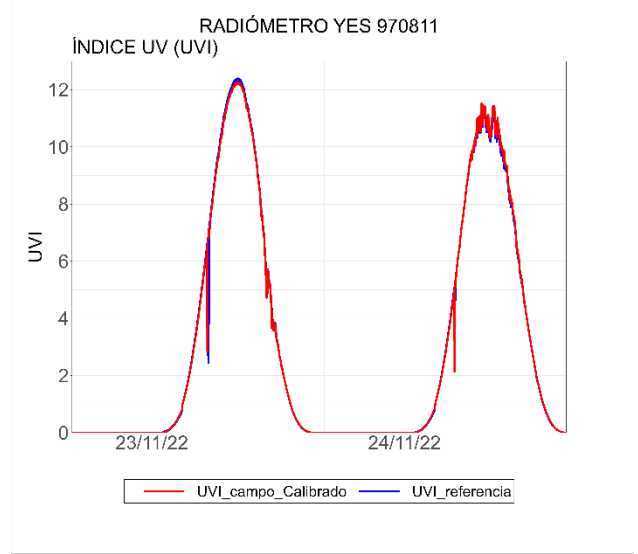
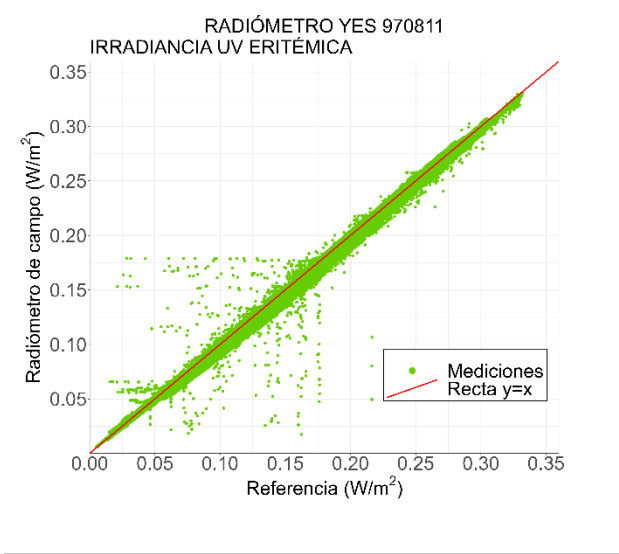
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 60703



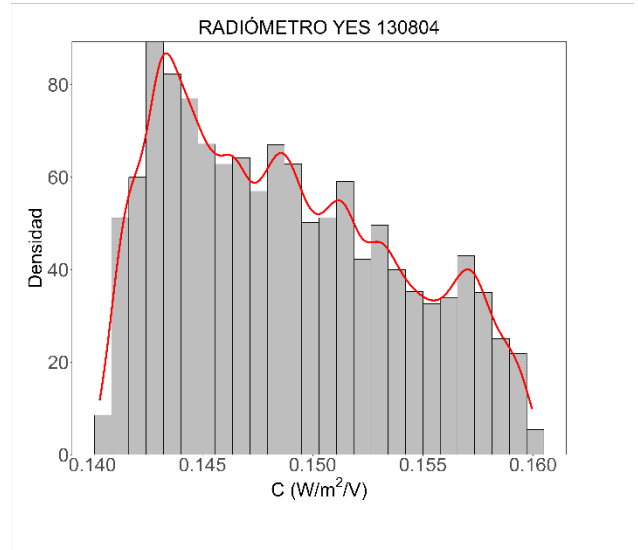
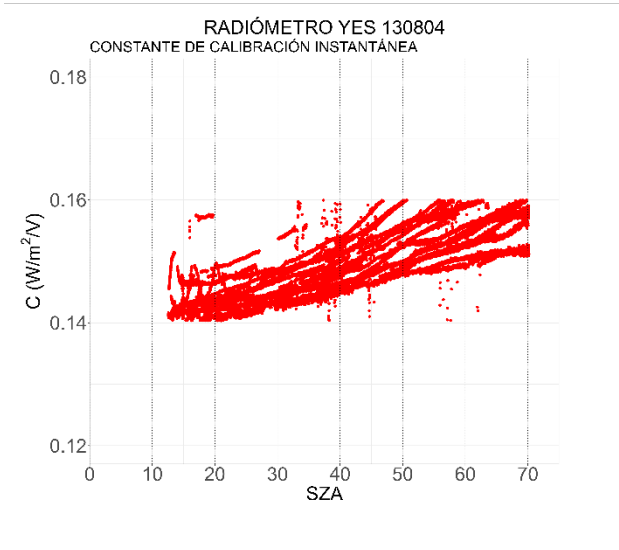
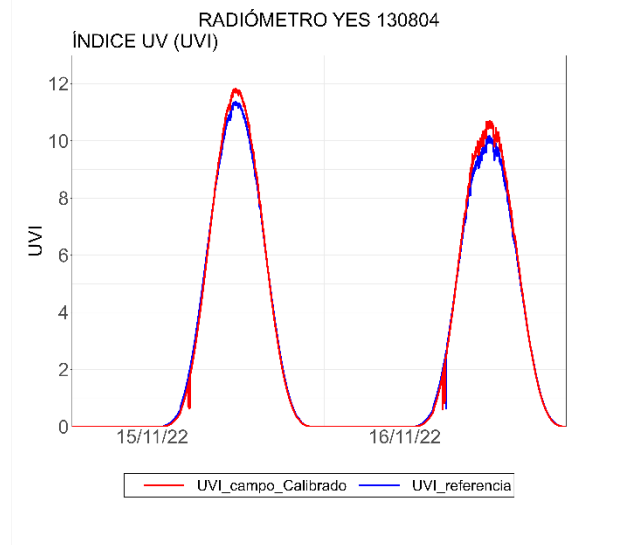
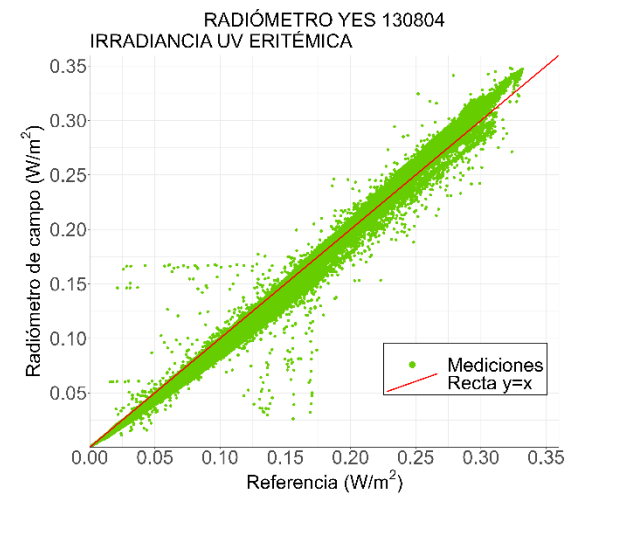
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 130806



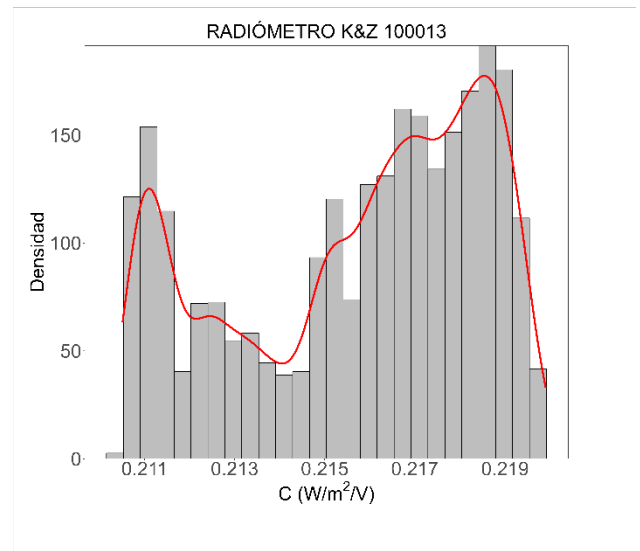
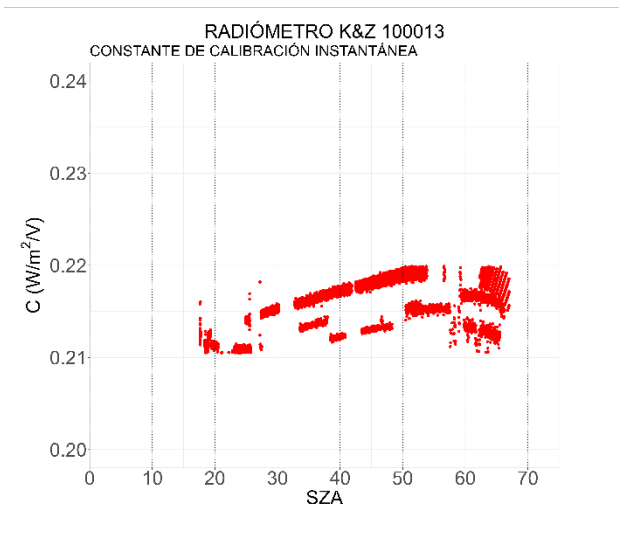
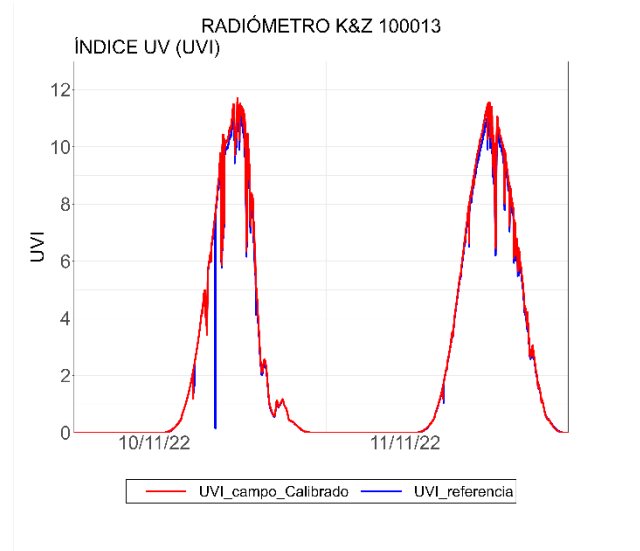
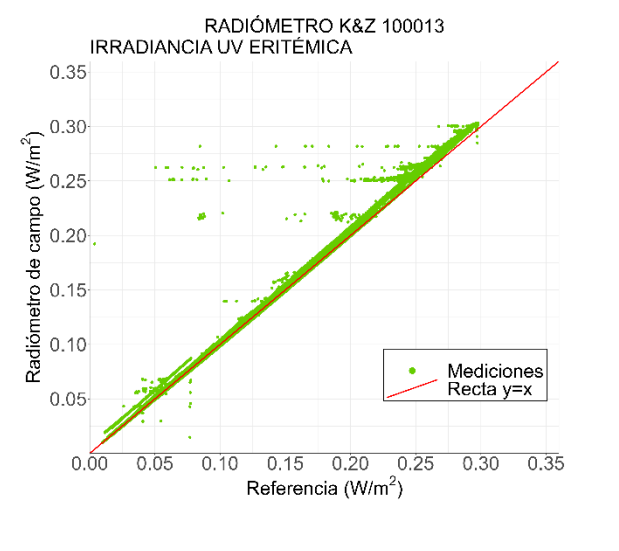
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 970811



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 130804

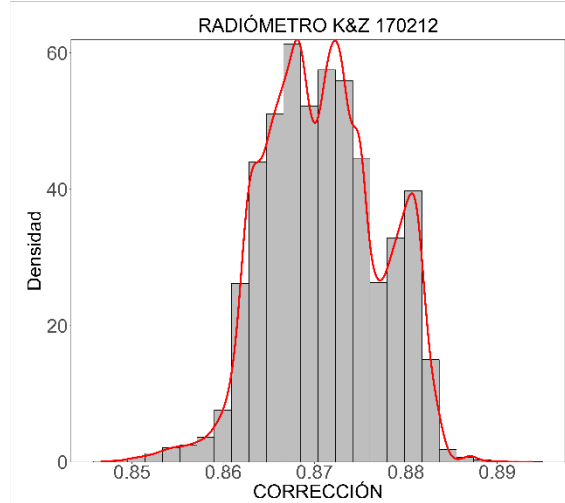
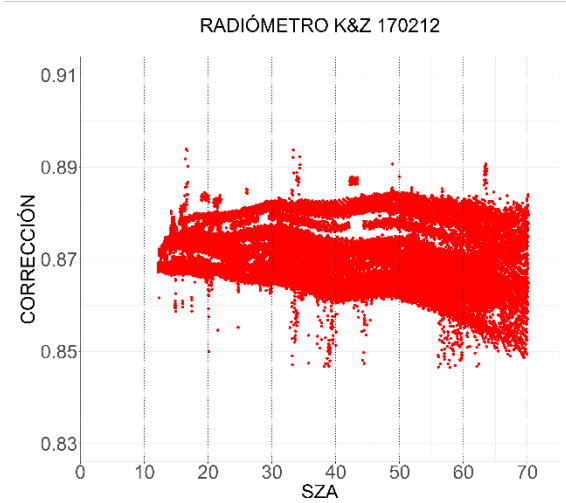
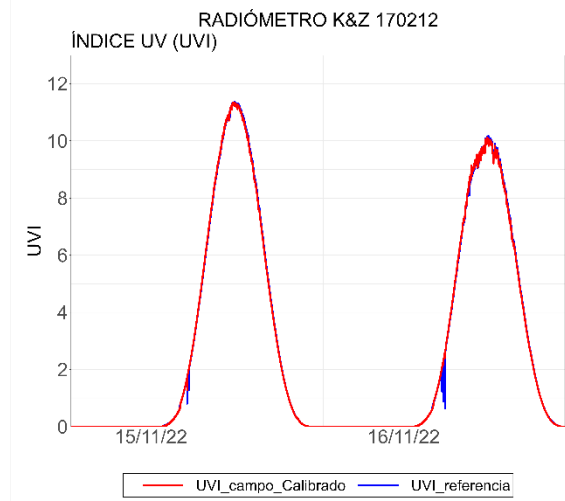
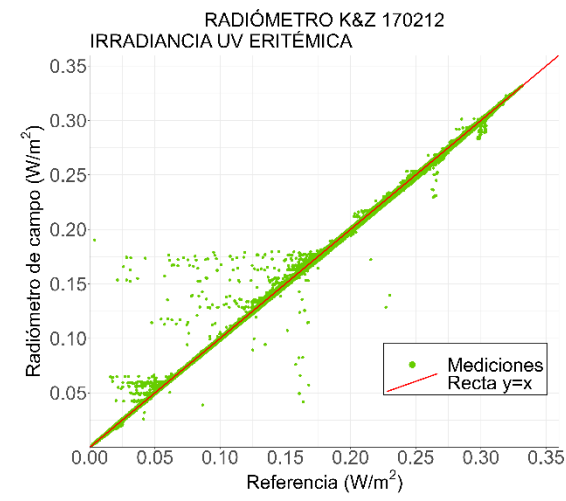


## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL K&Z 100013

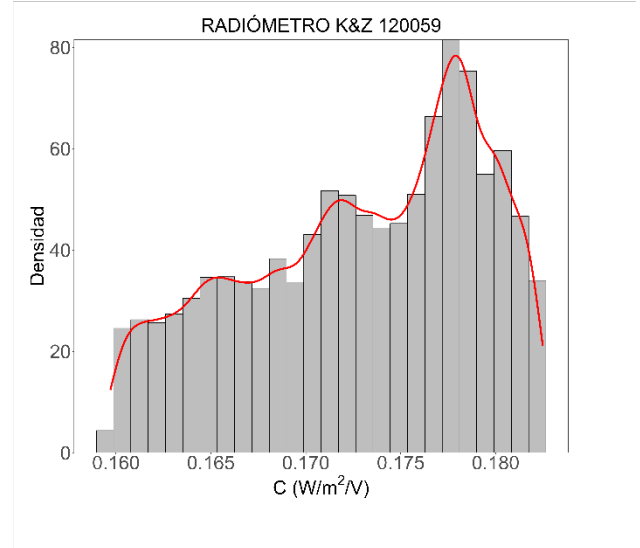
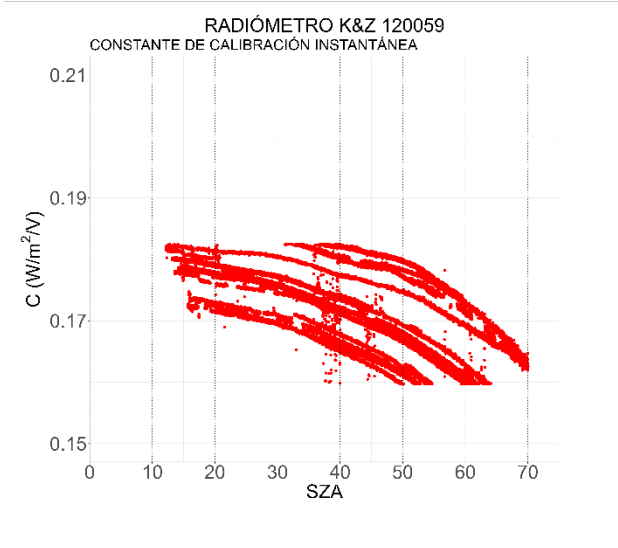
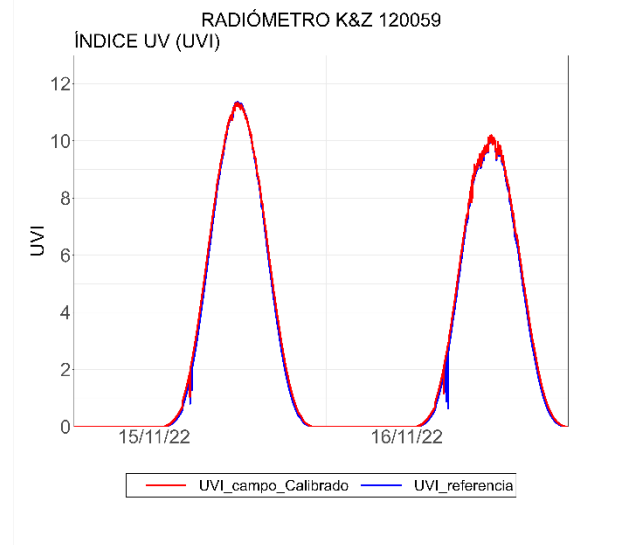
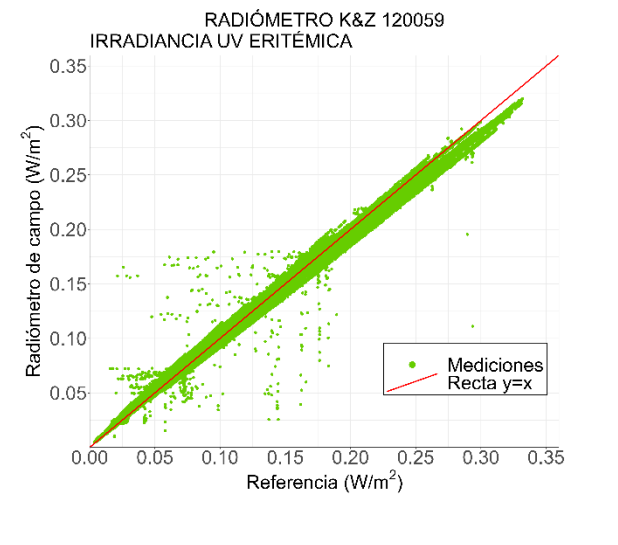




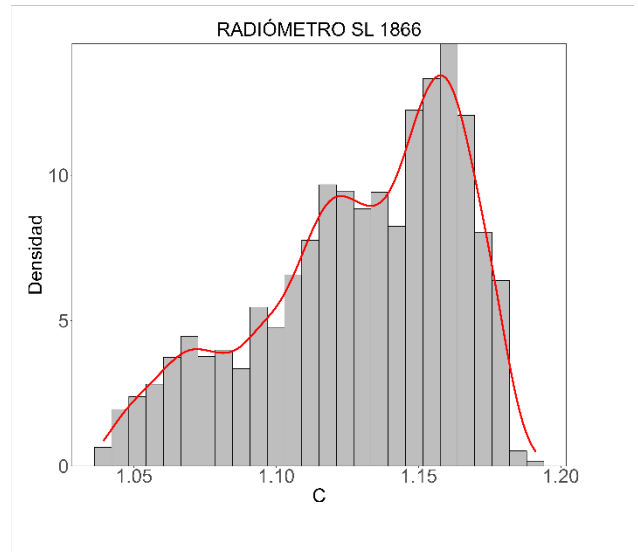
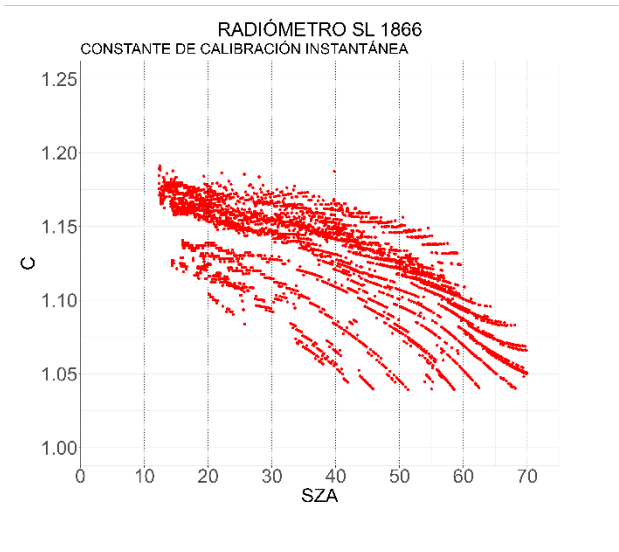
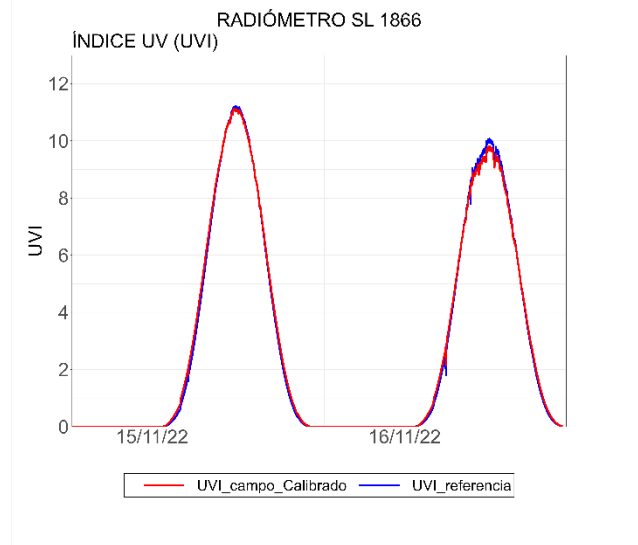
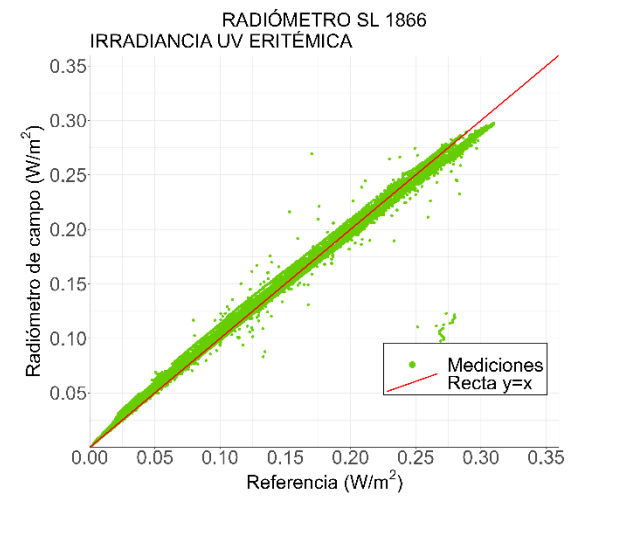
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL K&Z 170212



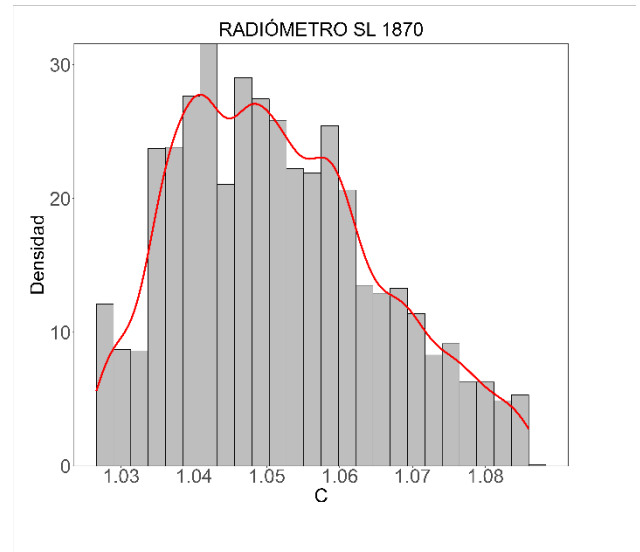
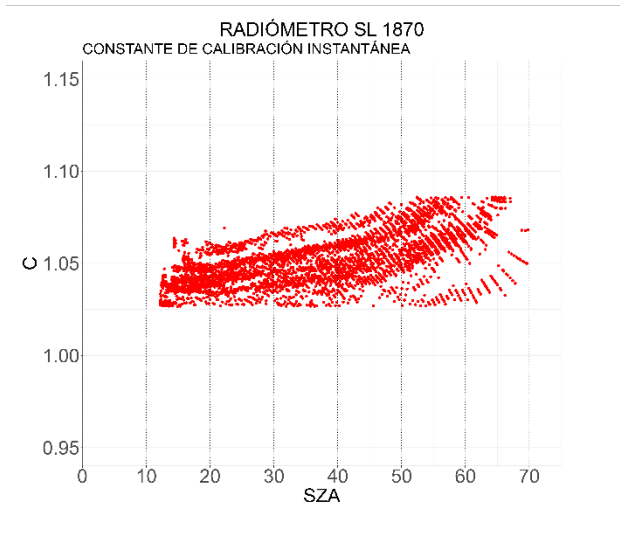
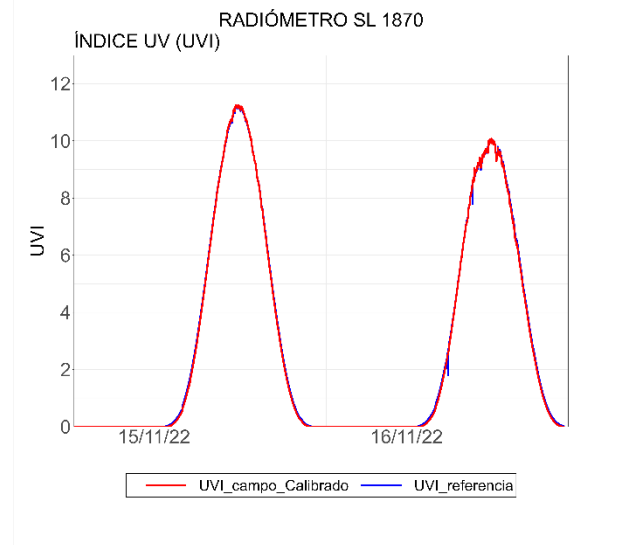
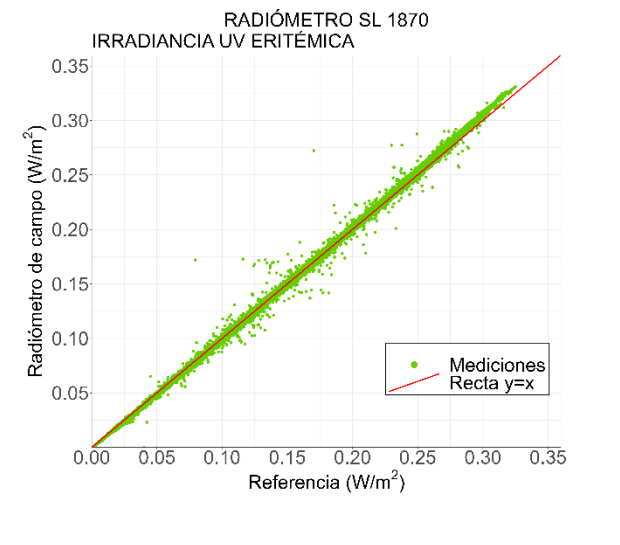
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL K&Z 120059



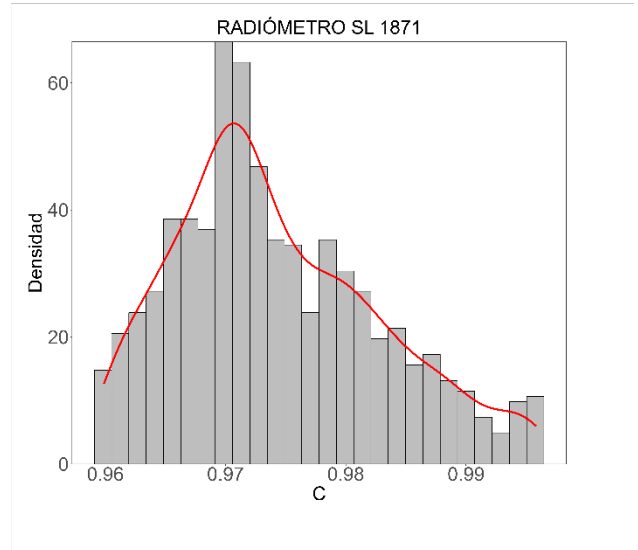
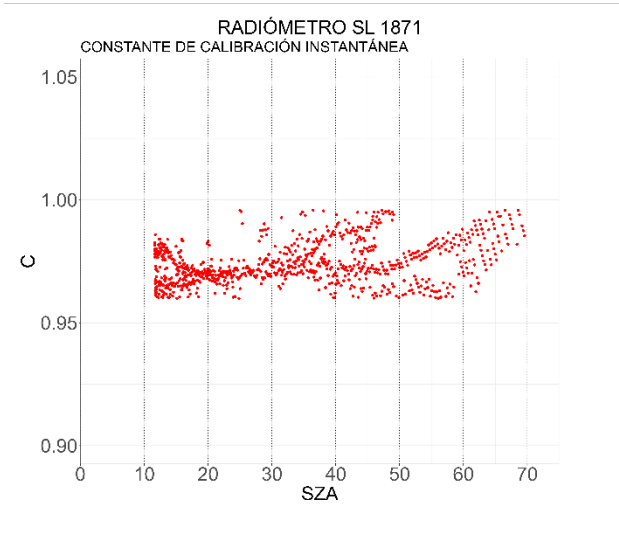
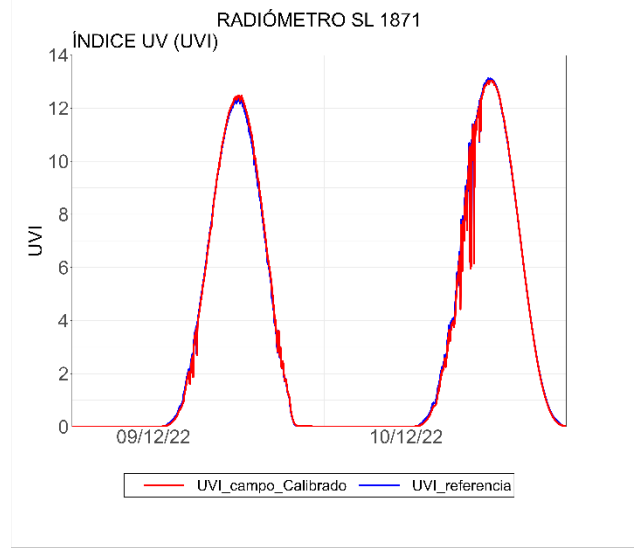
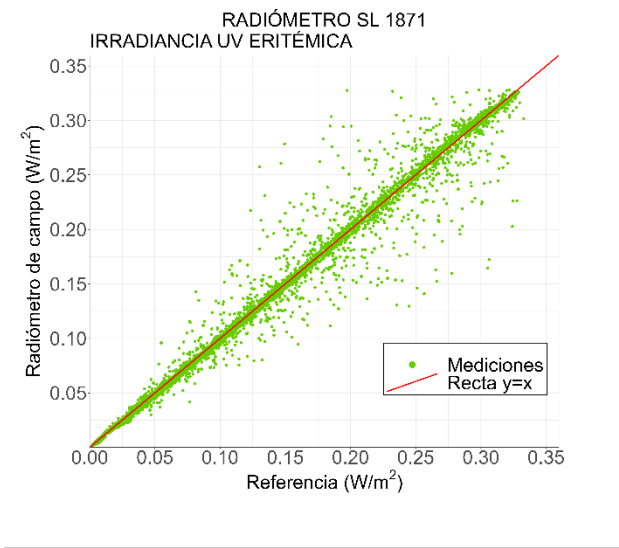
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 1866



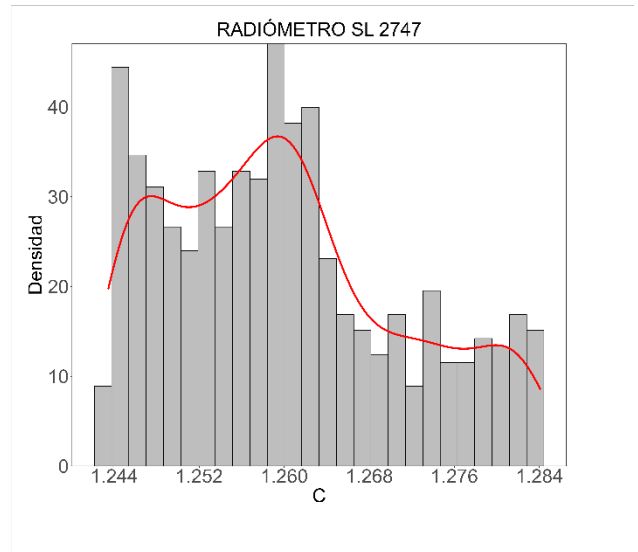
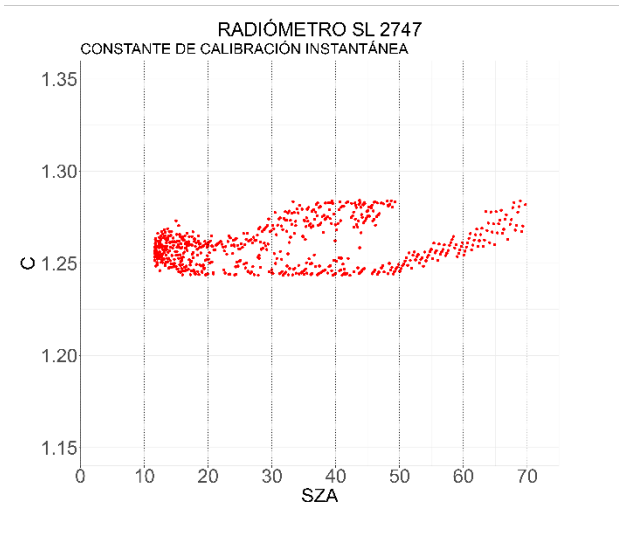
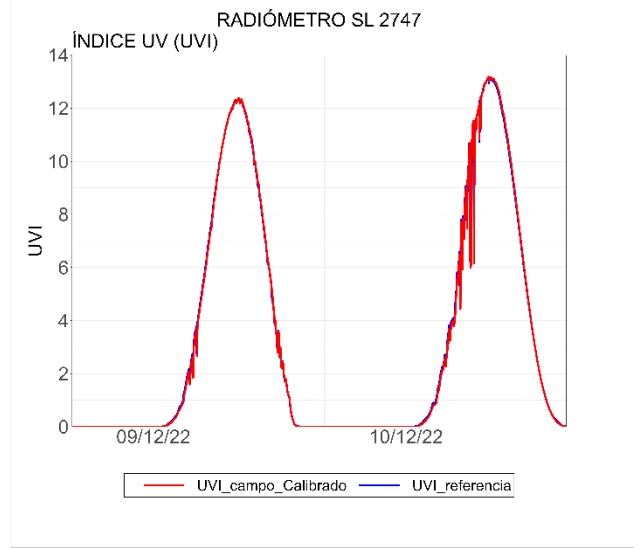
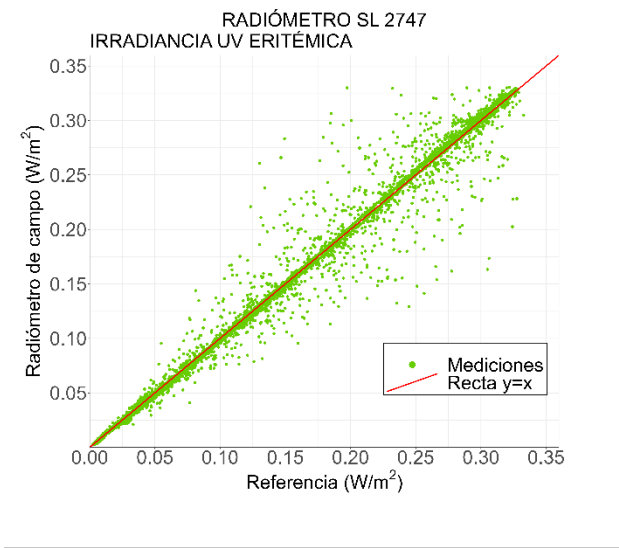
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 1870



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 1871

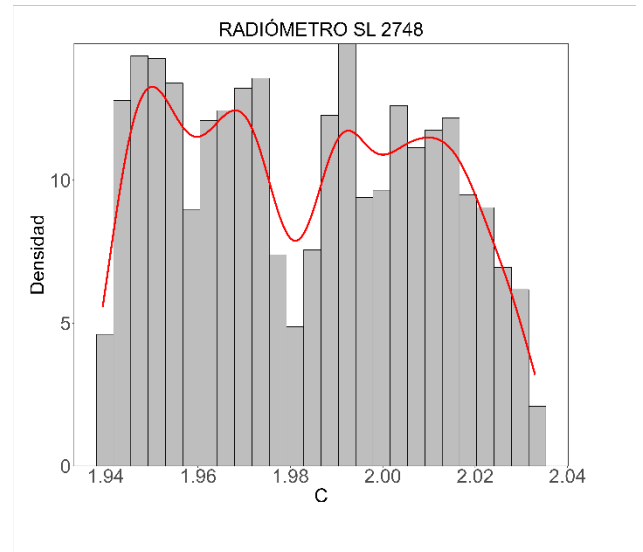
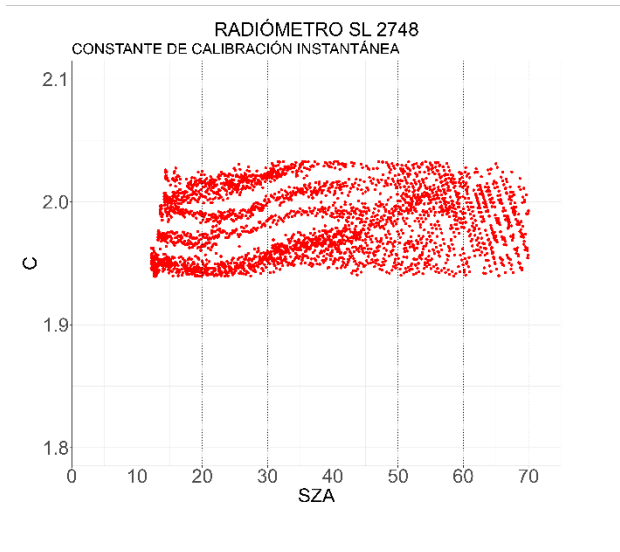
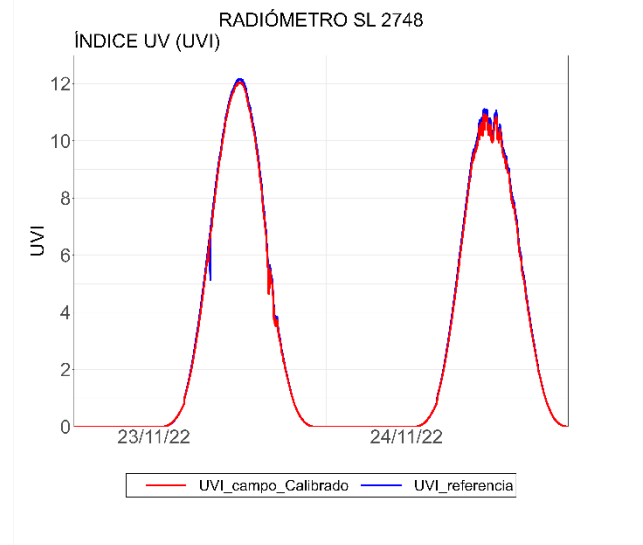
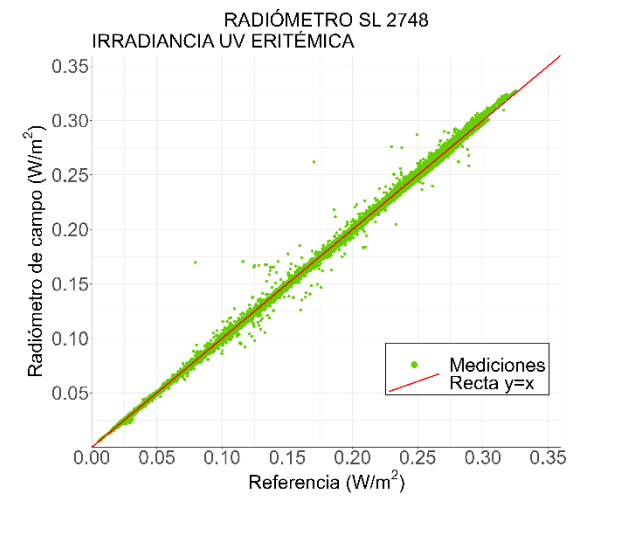


## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 2747

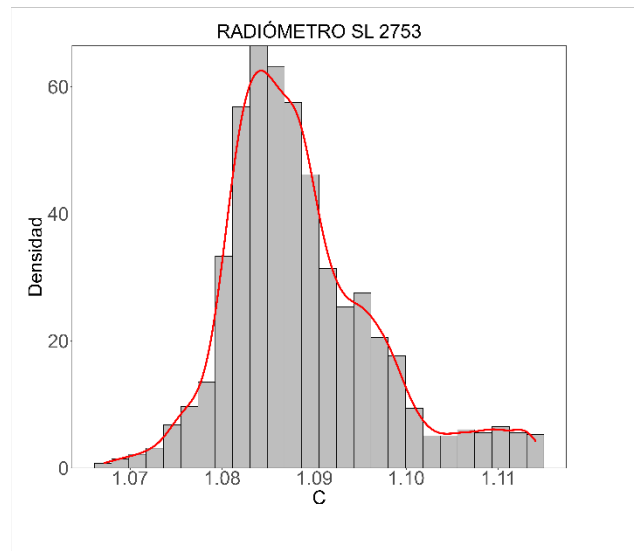
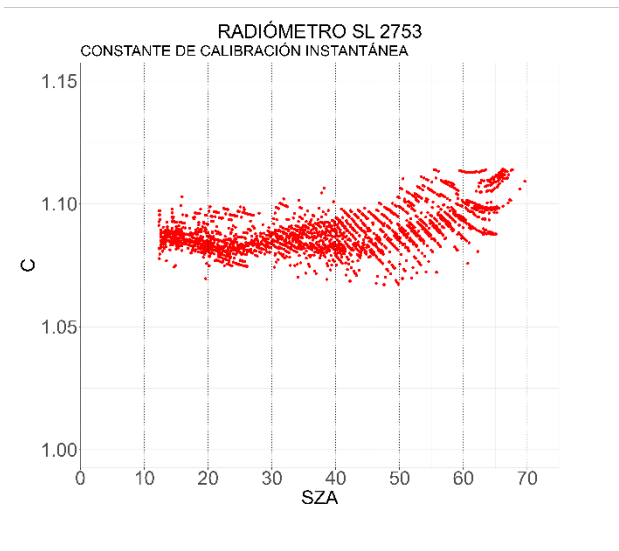
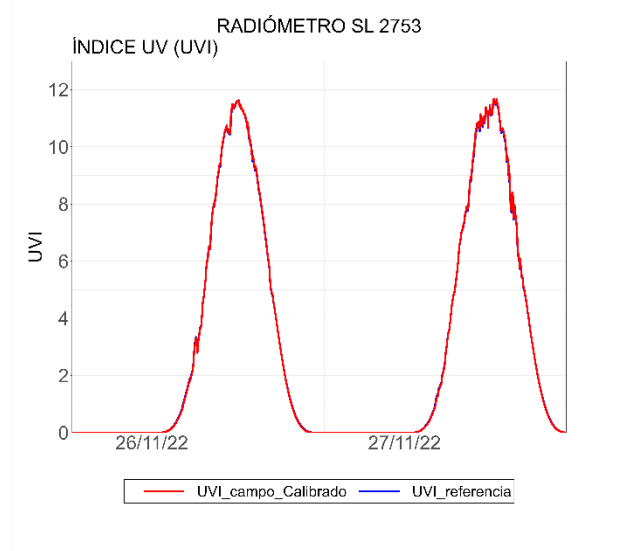
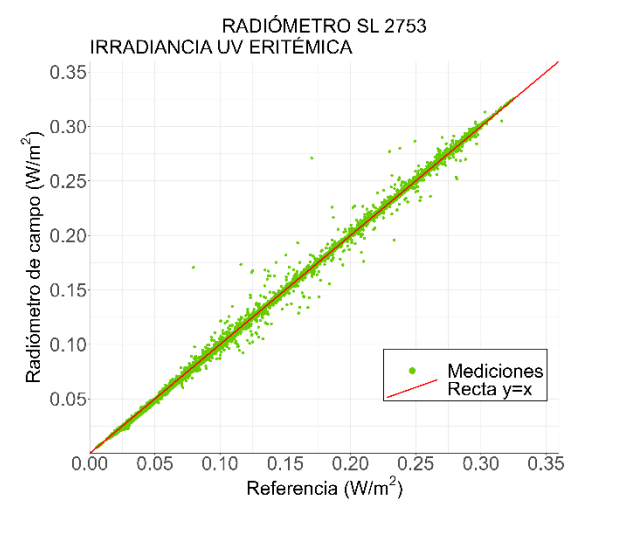




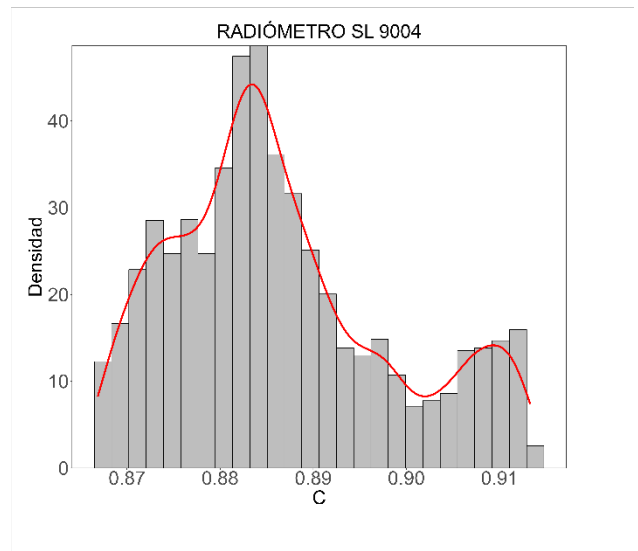
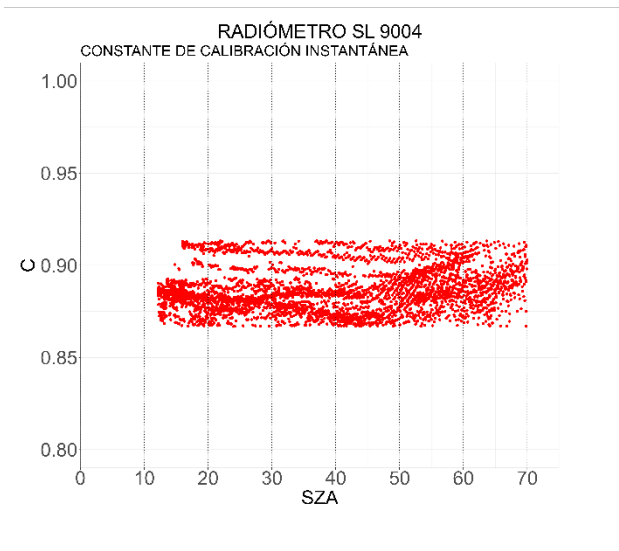
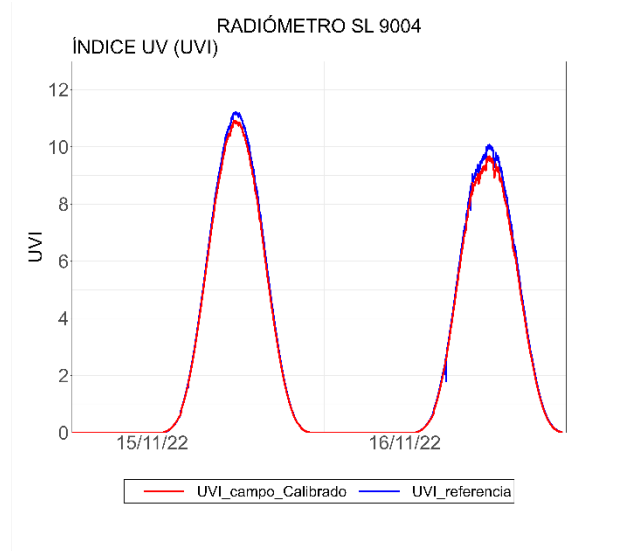
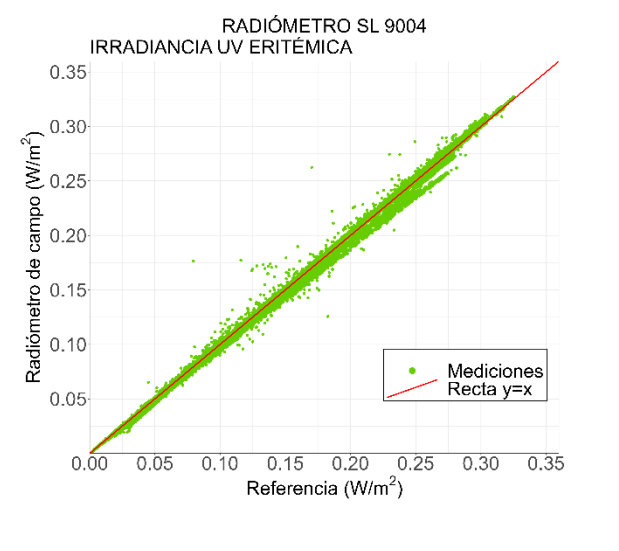
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 2748



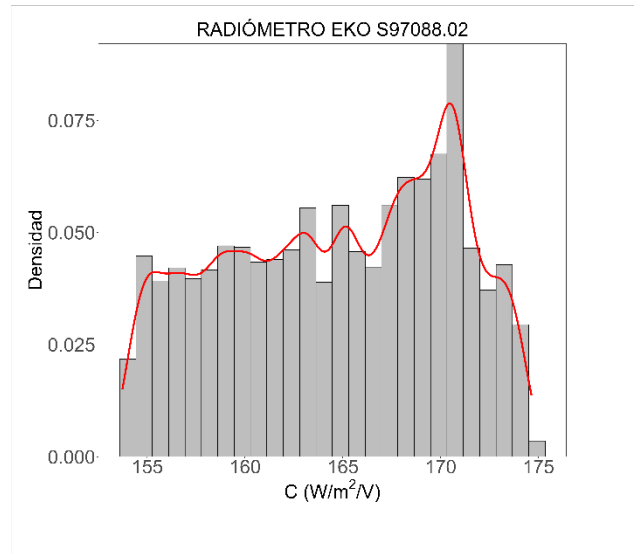
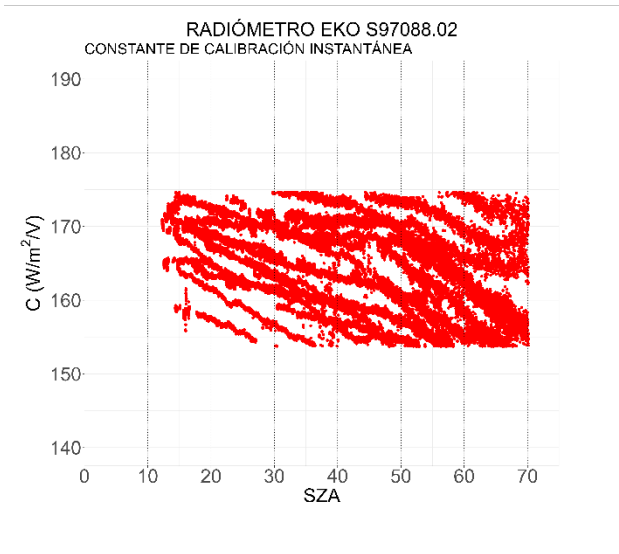
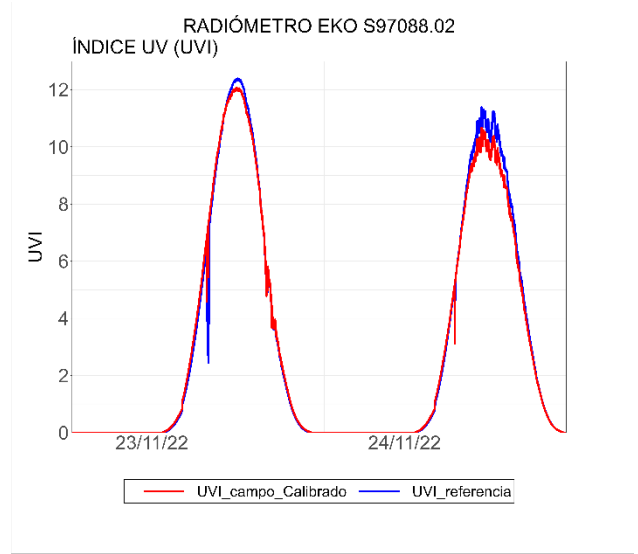
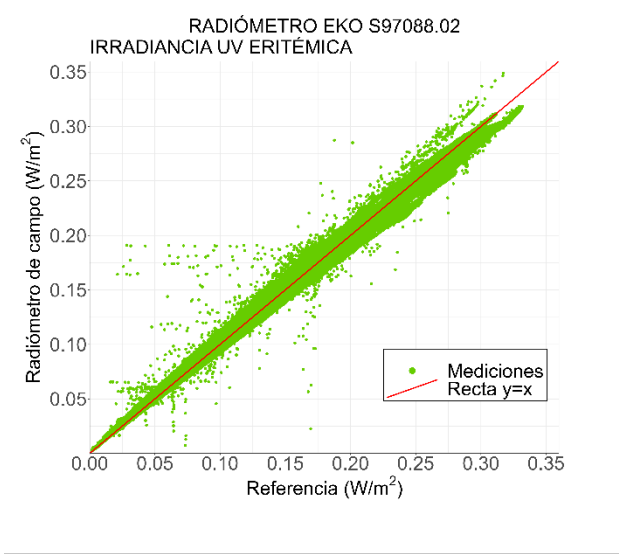
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 2753



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SL 9004

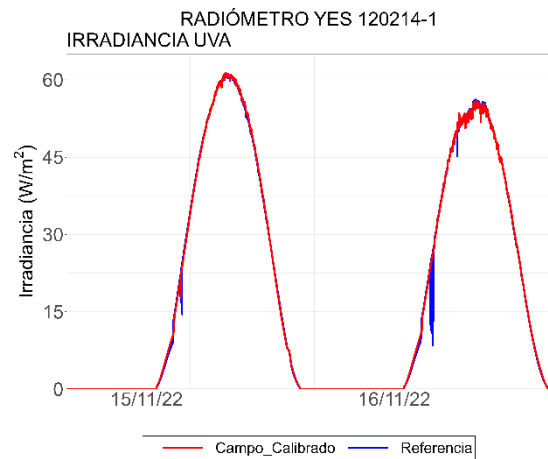
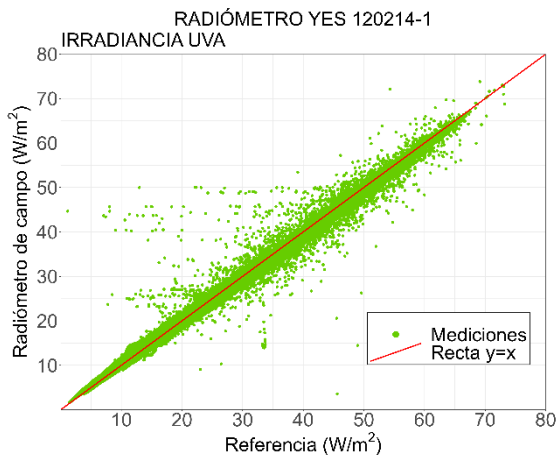


## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL EKO S97088.02

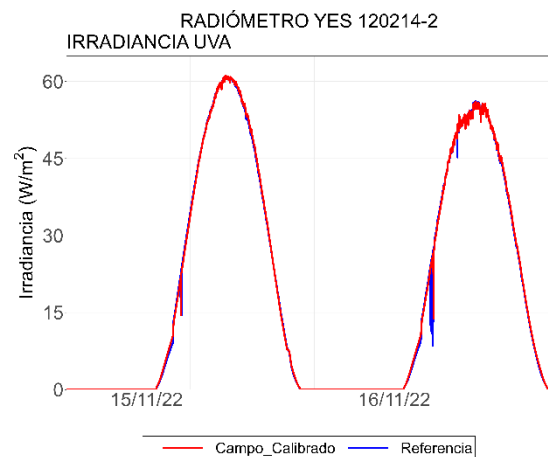
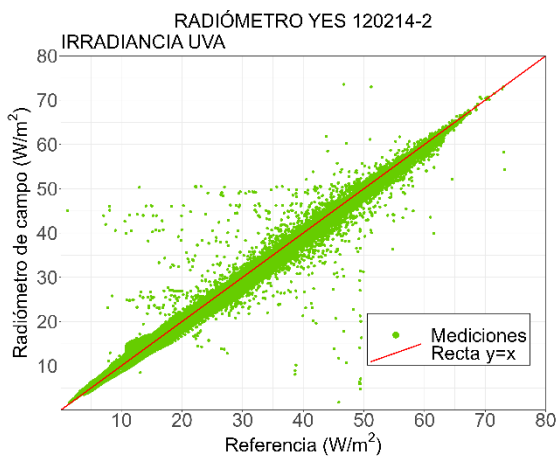


## APÉNDICE B: Resultados radiómetros UVA

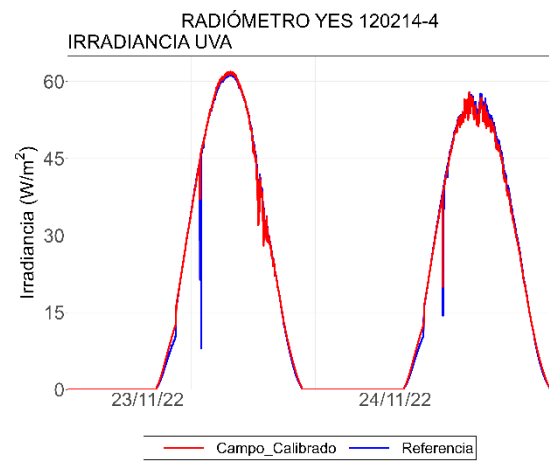
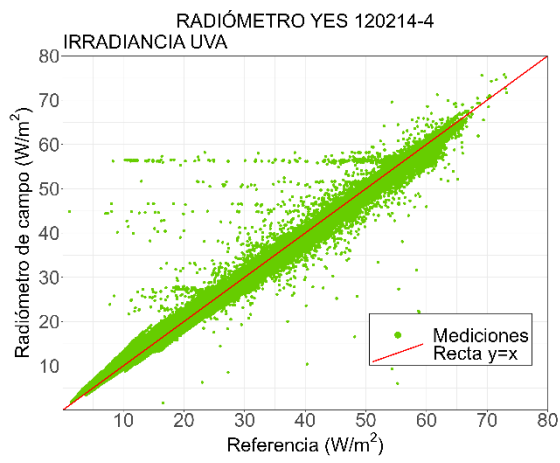
### RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 120214-1



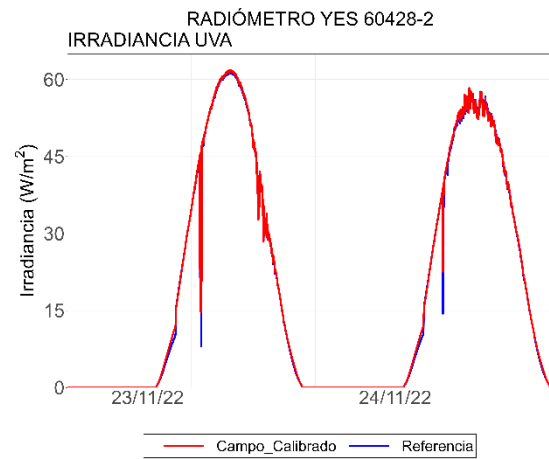
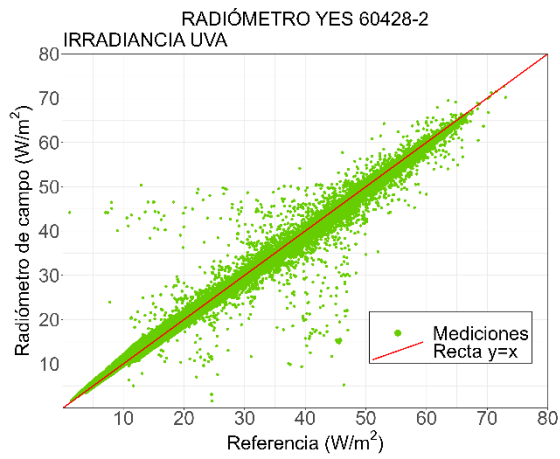
### RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 120214-2



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 120214-4

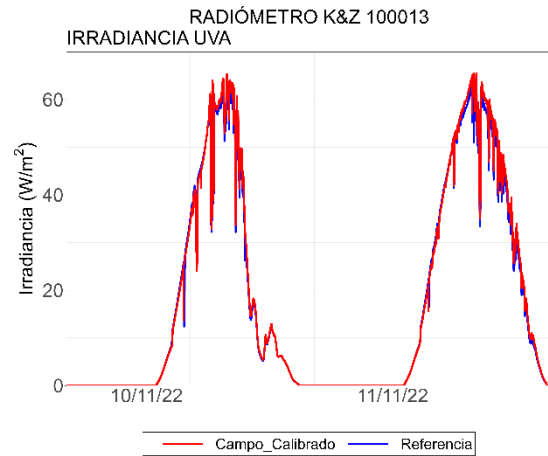
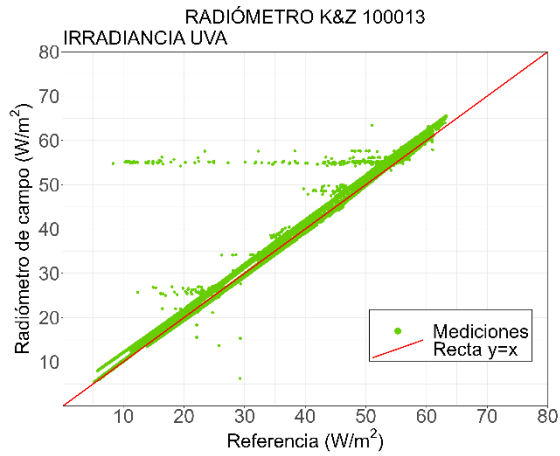


## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL YES 60428-2

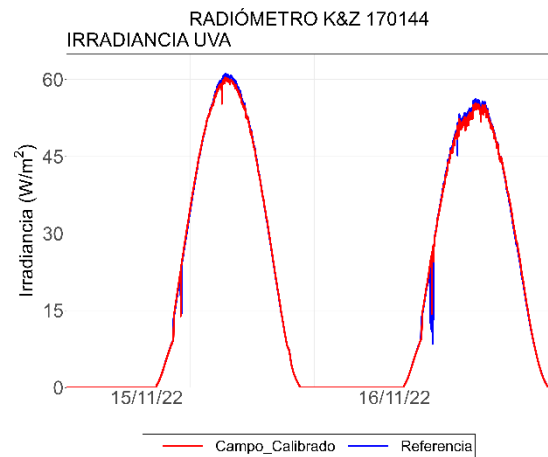
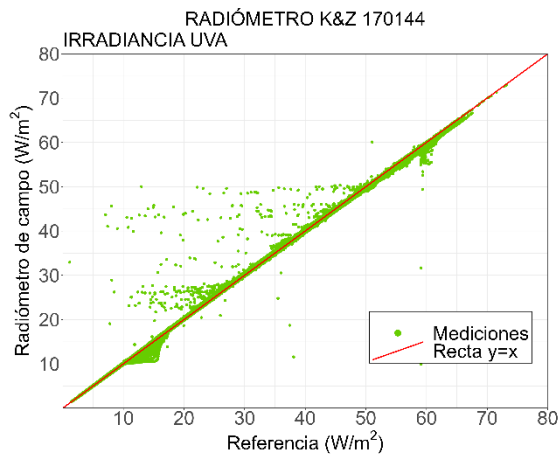




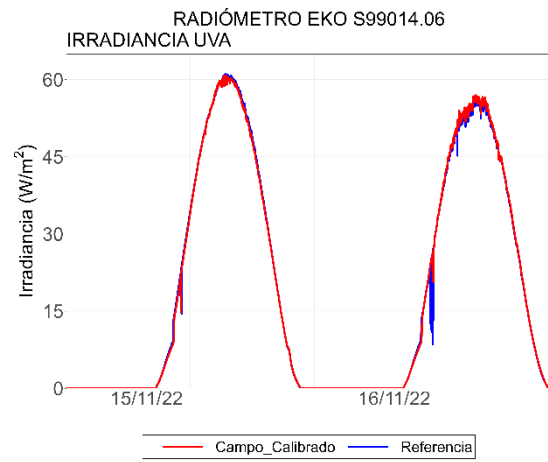
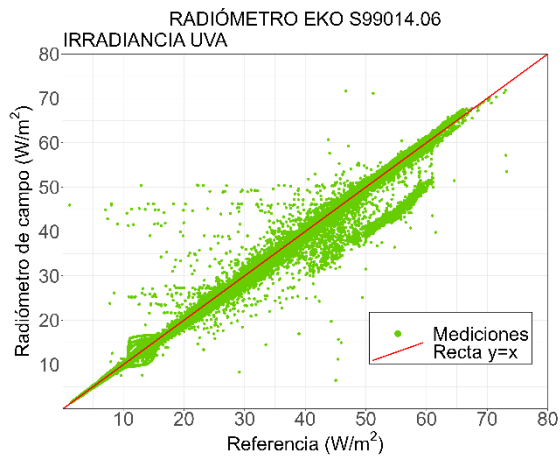
## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL K&Z 100013



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL K&Z 170144



## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL EKO S99014.06



## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).