

RECOMENDACIONES Y BUENAS PRÁCTICAS PARA LA MEDICIÓN Y REGISTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN TERRITORIO

2024





Recomendaciones y Buenas Prácticas para la Medición y Registro de la Radiación Solar en Territorio

Rodrigo Alonso-Suárez^a, Gonzalo Abal^a, Raúl Righini^b, Fernando Nollas^c, Fernando Martins^d, Olga de Castro Vilela^e, Gilberto Figueiredo^f, Elian Wolfram^c, Agustín Laguarda^a, Julián Lelli^{b,c}, Paola Russo^a, Andrés Monetta^a, Cristina Fedrizzi^g, Teddy Flores Meléndez^g, Emerson Torres^e, Rosana Aristegui^b, Rodrigo Santos Costa^h, André Rodrigues Gonçalves^h, Germán Salazarⁱ, Marcelo Karlen^j, Ernesto Marchesoni^k, Nestor Santayana^k, André Mocelin^g, Roberto Zilles^g

^a Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República, Uruguay.

^b Grupo de Estudios de la Radiación Solar, Universidad Nacional de Luján, Argentina.

^c Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

^d Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

^e Centro de Energias Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

^f Universidade Federal Fluminense, Brasil.

^g Instituto de Energía y Ambiente, Universidade de São Paulo, Brasil.

^h Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil.

ⁱ Grupo de Estudio y Evaluación de la Radiación Solar, Universidad Nacional de Salta, Argentina.

^j Organismo Argentino de Acreditación, Argentina.

^k Instituto Uruguayo de Meteorología, Uruguay.



Resumen:

El registro de buena calidad sobre la radiación solar incidente en la superficie terrestre es relevante para varias actividades humanas, entre las que se encuentran los sistemas de aprovechamiento de la energía solar y la eficiencia energética, entre otros. La precisión y exactitud en la medición de este recurso determina en gran medida el desarrollo de las aplicaciones de energía solar, en tanto cualquier sesgo introducido y la incertidumbre del propio relevamiento se trasladan directamente a la rentabilidad y riesgo financiero de los proyectos. El presente documento reúne recomendaciones y buenas prácticas de medición y registro de la irradiancia solar en superficie terrestre, a fin de garantizar que las campañas de medición del recurso solar disponible sean confiables para el desarrollo de proyectos. Se distinguen diferentes niveles de incertidumbre de medición asociados a la calidad de los instrumentos de medida utilizados y las características del mantenimiento sobre la estación. Se definen condiciones de registro, características recomendadas para las estaciones, y se sugieren algunos formatos para almacenar y compartir la información, así como algunos controles de calidad básicos sobre las mediciones. Se establecen recomendaciones para la calibración de los equipos y las competencias técnicas, de infraestructura y funcionamiento, esperables de los centros de calibración. El documento busca brindar una guía práctica en Latinoamérica para las Instituciones, Centros de Investigación o Emprendimientos Privados que quieran realizar un registro de calidad, útil y sistemático del recurso solar. Esta guía ha sido preparada por integrantes de centros especializados de la región en la medida de la irradiancia solar, con el objetivo de contribuir a la consolidación o generación de campañas de medición robusta y de baja incertidumbre de esta variable en Latinoamérica, como vía para mejorar el conocimiento regional de este recurso y generar redes de colaboración continental que fomenten un mayor desarrollo de la energía solar.



INSTITUCIONES, CENTROS Y LABORATORIOS PARTICIPANTES



LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



GERSolar - INEDES

Universidad Nacional de Luján



OAA ✓

Organismo
Argentino de
Acreditación





ÍNDICE

GLOSARIO	6
PARTE 1 - MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	7
1.1. Sobre el sitio de instalación de la estación de medición	8
1.2. Sobre la estructura de soporte de equipamiento	10
1.3. Sobre la instalación de los radiómetros	10
1.4. Sobre el cableado	10
1.5. Sobre la adquisición de datos	11
1.6. Sobre los radiómetros	12
1.7. Puesta en operación e intervenciones en la estación	14
1.8. Mantenimiento de la estación y de su equipamiento	15
1.9. Calibración de los equipos	17
1.10. Trazabilidad de las mediciones de irradiancia solar	17
PARTE 2 - REGISTROS DE LAS MEDIDAS Y METADATOS	19
2.1. Registro de metadatos	20
2.2. Registro de la medición	25
2.3. Formatos sugeridos	26
PARTE 3 - CALIBRACIÓN Y TRAZABILIDAD	28
3.1. Programa de calibración de los equipos	29
3.2. Recomendaciones para laboratorios de calibración en la región	30
3.3. Características esperadas de un centro de calibración regional	33
PARTE 4 - CONTROL DE CALIDAD	35
4.1. Inspección preliminar (chequeos básicos o globales)	38
4.2. Filtros de calidad básicos	40
4.3. Registro de los procedimientos de control de calidad	44
ANEXO A: EJEMPLOS DE CONTROL DE CALIDAD MÁS DETALLADOS	45
REFERENCIAS	48

GLOSARIO

BIPM	Bureau International de Pesas y Medidas
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
DHI	Irradiancia difusa en plano horizontal (Diffuse Horizontal Irradiance)
DNI	Irradiancia directa en incidencia normal (Direct Normal Irradiance)
GHI	Irradiancia global en plano horizontal (Global Horizontal Irradiance)
INM	Instituto Nacional de Metrología
IPC	International Pyrheliometer Comparison
IR	Radiación infrarroja (espectro de onda larga)
ISO	International Organization for Standardization
METAS	Federal Institute of Metrology (Suiza)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (EEUU)
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OSCAR	Observing Systems Capability Analysis and Review tool
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PMOD	Physical Meteorological Observatory in Davos (Suiza)
UTC	Coordinated Universal Time
UV	Radiación ultravioleta
WIGOS	World Meteorological Organization Integrated Global Observing System
WRC	World Radiation Center (Davos, Suiza)
WRR	World Radiation Reference
WSG	World Standard Group





PARTE 1

MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

► PARTE 1 - MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Esta sección describe las características requeridas para la instalación, operación y mantenimiento de una estación de medida de irradiancia solar, cuyo objetivo sea proporcionar datos confiables para la evaluación del recurso solar y el desarrollo de emprendimiento de energía solar. Existe gran cantidad de bibliografía al respecto y normas internacionales que establecen estándares deseables para este tipo de instalaciones, que buscamos aquí sintetizar y poner a disposición de las instituciones o equipos de trabajo en Latinoamérica interesados en un relevamiento de calidad del recurso solar disponible. Entre los documentos relevantes están los requerimientos básicos especificados por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN, <https://bsrn.awi.de/>), las normas específicas asociadas a recomendaciones sobre el uso de piranómetros de campo (tales como la norma ISO/TR 9901:2021) y el Capítulo 7 (Measurement of Radiation) de la Guía Nro. 8 [OMM, 2021] de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Dado el carácter general de este documento, nos centraremos en recomendaciones sobre la medición de la irradiancia solar global incidente a nivel de superficie (correspondiente al denominado rango de onda corta que se extiende entre los 300 nm y los 3000 nm). La medición de las componentes directa y difusa de la irradiancia solar, de radiación reflejada por el suelo o de porciones selectivamente acotadas del espectro resultan, por lo general, menos frecuentes en nuestra región, y por tanto esta primera versión del documento aborda el tipo de medición con mayor extensión territorial. Naturalmente, estas otras mediciones comparten especificaciones generales con los estándares requeridos para la medición de la irradiancia solar global, pero su adquisición presenta especificidades que quedan fuera del alcance de este documento.

1.1. Sobre el sitio de instalación de la estación de medición

La elección del sitio para la instalación de una estación de medición de la irradiancia solar resulta clave y siempre es el resultado de una valoración entre pros y contras, y costos y beneficios, que supone un equilibrio entre factores con pesos diferentes y en ocasiones contradictorios entre sí. Además de las consideraciones generales que se especifican a continuación, debe tenerse en cuenta como aspecto central que la evaluación del recurso solar debe ser sostenida en el tiempo. Determinar los valores diarios medios mensuales para que resulten confiables dentro de determinados niveles de significancia estadística requiere medir sostenidamente el recurso durante varios años. Este es un aspecto relevante que debe ser considerado al momento de la definición del sitio de emplazamiento.

La ubicación debe cumplir:

a) Ser representativa de la zona de interés donde se desea medir el recurso solar.

La especificidad de la ubicación varía dependiendo de las condiciones climáticas y geográficas de la zona. En ciertas regiones (como llanuras con homogeneidad orográfica y climática) un sitio puede resultar representativo en una zona amplia (distancias mayores a los 100 km, por ejemplo).



En otras (como en zonas montañosas, costas, cercanías de grandes cursos de agua, grandes lagos o regiones de transición climática y orográfica), la selección del sitio o de los sitios de medición resulta más restrictiva.

b) Estar alejada de entornos urbanos y, en lo posible, de carreteras importantes, estacionamientos, aeropuertos, edificios en general o fuentes de emisión de calor u otros gases que interfieran con la correcta medición de la irradiancia solar.

Es deseable que en la zona haya poco tráfico humano o animal. Dado que se busca que el sitio de medida se mantenga durante varios años, y por tanto la modificación de su ubicación es inconveniente, resulta también importante evaluar el desarrollo futuro de la zona, evaluando posibles cambios futuros en el entorno de la estación.

c) Tenga facilidades de abastecimiento de energía eléctrica y comunicaciones.

La operación de estaciones de medición requiere de electricidad y, típicamente, de conectividad remota. Si bien el suministro eléctrico puede ser brindado por sistemas auxiliares en determinados sitios o períodos del año (instalaciones fotovoltaicas, bancos de baterías, generadores de combustión interna, etc.), un servicio eléctrico estable y regular es siempre preferible. Un abastecimiento eléctrico de emergencia es también recomendado, con la capacidad suficiente de abastecer la demanda de la estación durante el tiempo necesario hasta que el servicio sea restablecido. La comunicación remota es importante. Muchos adquisidores de datos, además de registrar y almacenar localmente la información medida por los sensores, tiene la capacidad de comunicarse con servidores de recepción, procesamiento y almacenamiento a través de diferentes redes (red celular, conexión local, conexión punto a punto, etc.). Esta conectividad sirve también como conexión remota hacia la estación, por ejemplo, para conocer el estado u operarla en forma remota, lo que es una ayuda importante para detección o resolución de fallos. Una conectividad débil o poco confiable puede resultar en complejidades de todo tipo, incluyendo la pérdida de datos, uso excesivo del canal de comunicaciones (mayor costo del plan de datos o mayor uso de la batería), mayor necesidad de mantenimiento, problemas internos en el adquisidor a nivel de software, entre otros.

d) Tenga un horizonte despejado.

Las obstrucciones que puedan bloquear la irradiancia solar directa no debieran superar los 5° de altura (elevación desde el horizonte), medido desde la posición de instalación del instrumental. Esto se puede conseguir instalando el instrumento a una distancia que sea 12 veces la altura del obstáculo de mayor altura relativa en la zona o elevando el instrumental. Cuando evitar las obstrucciones no sea posible, éstas deben quedar al sur de la estación en el Hemisferio Sur o al norte de la estación en el Hemisferio Norte. En el caso en que haya antenas en las cercanías, las mismas son admisibles siempre y cuando no bloquen la irradiancia solar directa sobre el instrumento en ningún momento del año. Deben evitarse objetos reflectantes en las cercanías.

e) Pueda cercarse.

Un cerco delimitador siempre es una ventaja. El cerco, por supuesto, no debe ser un obstáculo que bloquee la irradiancia solar directa y debe permitir el acceso a los equipos y el sistema de adquisición asociado.



1.2. Sobre la estructura de soporte de equipamiento

Las estructuras de soporte pueden ser muy variadas. Por lo general las recomendaciones respecto a las mismas son las que indica el sentido común en relación a su objetivo: servir de soporte firme y sin sombreado al equipamiento destinado a medir la irradiancia solar. Para ser un buen soporte debe permitir un acceso sencillo al instrumental, estar firmemente sujetos al suelo de manera que no presente oscilaciones y movimientos cuando haya viento, y no varíe la horizontalidad de la medida. Es importante considerar que la estructura de soporte debe proporcionar condiciones adecuadas para que los radiómetros puedan ser instalados en posición horizontal y mantengan la nivelación con variaciones permitidas entre $\pm 0.1^\circ$. Para preverlo es necesario considerar posibles dilataciones térmicas de elementos metálicos que formen parte del soporte, especialmente en zonas con gran amplitud térmica a lo largo del día. Los equipos deben estar elevados del suelo con altura suficiente para que el requerimiento de horizonte despejado sea cumplido (ver 1.1.d). En el caso que varios instrumentos sean instalados sobre la plataforma, la misma debe tener el diseño adecuado para que ellos no interfieran entre sí (se proyecten sombra entre sí). En este sentido, las plataformas Norte-Sur son preferidas por sobre las Este-Oeste. La estructura debe estar puesta a tierra directamente o por intermedio de una barra de equipotencialización local o principal de la instalación, y contar con protección contra descargas atmosféricas.

1.3. Sobre la instalación de los radiómetros

Los radiómetros, instalados sobre la estructura de soporte, deben ser nivelados horizontalmente, con un error respecto a dicha posición que no puede superar los 0.1° . Es recomendable utilizar un medio de fijación del radiómetro a la estructura de soporte que permita la nivelación pero que impida su caída accidental. Los cables deben estar conectados a los equipos de manera que la salida de los mismos sea hacia el sur en el Hemisferio Sur o hacia el norte en el Hemisferio Norte. De ser posible, deben emplearse unidades de ventilación (que ventilan los instrumentos desde la parte inferior). Estas unidades pueden ser aquellas indicadas por los fabricantes o de construcción local, siempre que su alimentación no interfiera eléctricamente con el registro de las mediciones (algo que se debe verificar). El uso de ellas permite que las cúpulas de los radiómetros permanezcan limpias de polvo y suciedad, y evitan la condensación de humedad sobre las mismas. En particular, en condiciones de rocío o inmediatamente después de una lluvia, la medición de la irradiancia solar puede alcanzar diferencias grandes respecto al valor real (por ejemplo, del orden de un 30%, dependiendo del momento del día y la condición de cielo), lo cual se evita con el empleo de estas unidades. En zonas donde ocurren nevadas o heladas, es importante añadir una unidad calefactora. Una ventaja adicional de estas unidades es que reducen el error de offset térmico de los radiómetros. Dada la importante mejora en la calidad de las mediciones que supone su uso, se recomienda su empleo en las estaciones donde esto sea posible.

1.4. Sobre el cableado

El cableado de los sensores (entendiéndose por él, todo el recorrido que los cables realizan desde el sensor hasta el adquisidor de datos) debe tener la menor longitud posible. Para



ello puede ser necesario colocar el adquisidor de datos en las cercanías de la estructura de soporte. Una longitud no mayor a los 10 metros es lo recomendado en el caso de sensores con salida analógica de voltaje. Para mayores distancias, es conveniente realizar un chequeo de la medición contra un sistema de adquisición de referencia. Si los sensores entregan una señal de salida digitalizada con transmisor integrado, esa distancia puede ser considerablemente mayor, dependiendo del protocolo de intercambio de señales que se use y de la red de soporte empleada.

Los cables que transportan señal deben pasar a través de conductos separados de los cables de alimentación eléctrica, siempre que sea posible. En el caso en que los cables deban cruzarse, deben hacerlo en ángulo recto para reducir la interferencia eléctrica. Pueden usarse cables blindados cuando las condiciones de aislación eléctrica así lo requieran, poniendo a tierra la malla de los mismos de manera apropiada. Se debe proveer un enrutamiento adecuado de las líneas de energía y señal de manera que se minimice el área de lazos de inducción.

El cableado entre el instrumento y el sistema de adquisición de datos (incluyendo borneras de interconexión) debe estar cuidadosamente conectado a tierra y protegido contra descargas atmosféricas. Existen ejemplos mostrados en el sitio de la BSRN, orientativos a los efectos de planificar la instalación y su protección.

1.5. Sobre la adquisición de datos

Como regla general, puede considerarse que el adquisidor de datos debe estar en las cercanías del instrumental de medición. Este requisito puede relajarse si los datos enviados al adquisidor son en formato digital, donde dependiendo del protocolo de intercambio y la red física de enlace, las distancias pueden llegar a ser considerables (de varios cientos de metros en algunos casos). El adquisidor debe estar a resguardo de la intemperie, en un recinto que se mantenga seco en el tiempo (al menos, hasta el próximo mantenimiento programado), convenientemente protegido de descargas eléctricas, y conectado a tierra.

Las mediciones realizadas por el adquisidor deben ser, preferentemente, diferenciales, con el objetivo de minimizar ruidos externos. Se debe compatibilizar la impedancia de entrada del canal registrador de acuerdo con la impedancia del instrumento. El tiempo mínimo de integración para las señales de irradiancia debe ser un ciclo del período de la tensión de alimentación, para eliminar el ruido de frecuencia de la línea eléctrica. Para mediciones de campo, la precisión del adquisidor debe ser de al menos un $\pm 0.15\%$ de la lectura más el offset que pueda introducir. Se recomienda que este offset no represente más del $\pm 0.1\%$ del fondo de escala utilizado. Para estimar la precisión general del sistema de registro se deben considerar el adquisidor junto con el cableado al instrumento de medición. La precisión general no debe superar en ningún caso el 10% de la incertidumbre de la observación (por ejemplo, un 1 W/m^2 de contribución para un valor de incertidumbre total de 10 W/m^2), y en caso contrario, se debe colocar una etapa de preamplificación de alta calidad a la medida. Para la medición con fines de calibración, es necesario una adquisición de datos de mejores prestaciones dado que la norma ISO 9847:2023 exige que la incertidumbre aportada por el sistema de adquisición (todos los elementos entre

el instrumento y la digitalización de la medida) no supere el valor de $\pm 0.1\%$ de la incertidumbre total. En todos los casos, se debe controlar que el adquisidor esté configurado de manera tal que la cantidad de decimales necesaria sea preservada en el muestreo y registro del dato. Las frecuencias de muestreo recomendadas son entre 0.1 Hz y 1 Hz (tasas de muestreo de 10s a 1s, de modo de que estén en concordancia, al menos, con el tiempo de respuesta de un instrumento Clase A, ver Tabla 1), y se recomienda que los datos sean almacenados al menos con frecuencia minutal, registrando el valor promedio de irradiancia muestreada durante el intervalo de registro definido. También es apropiado registrar en la misma base temporal el desvío estándar, y los valores máximo y mínimo, durante el intervalo. En algunos casos, cuando las restricciones de almacenamiento o transmisión de datos sean críticas, es aceptable que sólo se almacene el valor promedio. Si se define un valor diferente para la frecuencia de muestreo, convergen allí dos variables a tener en cuenta: la velocidad de respuesta del *datalogger* instalado, y la propia velocidad de estabilización de la señal que entrega el radiómetro. Como norma general, el muestreo abundante es preferible al escaso, y siempre que fuese posible dada las características del adquisidor, el valor de 1 Hz para el mismo se considera la mejor elección. En caso que se midan otras variables meteorológicas (tales como la temperatura), es recomendable que las frecuencias de muestreo y registro sean iguales a las empleadas para la irradiancia solar. Es importante que las frecuencias de muestreo y de registro se establezcan a partir de un análisis previo del funcionamiento de la estación y una valoración de los puntos anteriores, tendiendo a que su permanencia en el tiempo de operación de la estación sin modificación sea la mayor posible.

Todos los adquisidores de datos profesionales tienen posibilidad de sincronizar sus relojes con una fuente externa que provea la hora. Se aconseja que la diferencia entre la hora registrada por el adquisidor y la hora oficial del sitio de instalación del mismo no difiera en más del 1% del período tomado para promediar los datos. En el caso de medias minutales, se establece 1 segundo como la máxima diferencia tolerada entre el tiempo marcado por el adquisidor y el tiempo real. La sincronización con servidores de tiempo disponibles en internet es suficiente para el cumplimiento de este punto y se recomienda realizarla al menos una vez por día.

1.6. Sobre los radiómetros

La medición de la irradiancia solar presenta varias opciones de instrumental. Las opciones y posibilidades están condicionadas por argumentos técnicos y económicos, muchas veces contrapuestos. La determinación del instrumental más adecuado para un fin particular depende del uso específico que se dará a la información, las características ambientales, las posibilidades de mantenimiento y el costo. Cuando la información recolectada tiene objetivo de ser empleada para proyectar emprendimientos que usen la radiación solar como fuente de energía, resulta más que justificado medir la irradiancia solar con la menor incertidumbre posible. Esta incertidumbre se traslada luego al riesgo de los proyectos solares a través de la incertidumbre en el retorno económico y el flujo de caja, por lo que resulta clave evaluar de manera confiable el recurso. Lo mismo puede argumentarse para otras aplicaciones donde los montos de inversión sean elevados, en el sector energía y otros. Una baja incertidumbre en la medición es necesaria también para el ajuste y validación de modelos satelitales de estimación de la irradiación solar. En resumen, cuando se trata de evaluar el recurso solar o de ajustar



herramientas de estimación para este fin, la filosofía dominante debe ser la de emplear el mejor equipamiento que pueda adquirirse.

Existen radiómetros de diferentes cualidades y calidades. Los equipos se diferencian por su respuesta espectral, su incertidumbre de medida, la velocidad con que estabilizan la señal de salida, la dependencia de la señal de salida con la temperatura ambiente, la inestabilidad anual de su sensibilidad, su apartamiento de la linealidad, su respuesta direccional, entre otras. La norma ISO 9060:2018 clasifica los tipos de radiómetros, indicando para cada tipo el rango aceptable de las especificaciones relevantes. Los radiómetros son categorizados (de mayor a menor calidad) como A, B y C. La norma engloba los dos tipos principales de radiómetros existentes en el mercado: los radiómetros de Silicio (radiómetros fotovoltaicos) y los radiómetros de termopila (piranómetros).

Los piranómetros brindan mediciones con una incertidumbre menor que los radiómetros fotovoltaicos (también llamados comercialmente piranómetros de Silicio, aunque no es una terminología adecuada para estos equipos). Los piranómetros son de respuesta más lenta (típicamente menor a 0.5 minutos), aunque los fabricantes reducen sistemáticamente este tiempo de estabilización modelo tras modelo. Su respuesta espectral es fuertemente plana en el rango entre los 300-3000 nm (espectro solar) y la estabilidad de su sensibilidad es alta, significativamente mayor que la de los radiómetros fotovoltaicos. Consecuentemente, el costo de un piranómetro es mayor que el de un radiómetro fotovoltaico, y se consideran los equipos más adecuados para la medición de la irradiancia solar para su relevamiento climatológico y como insumo para aquellas aplicaciones que requieran baja incertidumbre en la información del recurso solar, como lo son los emprendimientos de energía solar.

Los radiómetros fotovoltaicos usan la proporcionalidad entre la corriente entregada por una celda fotovoltaica y la irradiancia solar recibida. Tienen algunas ventajas respecto a los piranómetros para aplicaciones específicas, que los pueden hacer adecuados en algunos casos: son de respuesta muy rápida (del orden de milisegundos), la determinación de su sensibilidad no depende del ángulo de inclinación del sensor y su costo es sensiblemente menor. En oposición, su respuesta espectral no es plana y la degradación de la celda fotovoltaica puede hacer necesarias recalibraciones frecuentes (con cadencia anual), es decir, su estabilidad es menor. Resultan especialmente aptos en condiciones climatológicas que suponen un fuerte estrés térmico para una cúpula de cuarzo tal como tienen los piranómetros y en aplicaciones que no requieran gran precisión en la medida.

Se incluye debajo en la Tabla 1 la clasificación de radiómetros especificada en la norma ISO 9060:2018. Un equipo con calidad de Estándar Secundario, debidamente calibrado y con trazabilidad al patrón primario internacional alojado en el World Radiation Center (WRC, <https://www.pmodwrc.ch/>), puede ser empleado para la calibración de otros radiómetros de menor o igual jerarquía, de acuerdo a los criterios establecidos en los mecanismos de intercomparación.

Tabla 1: Especificación de radiómetros de irradiancia solar de la norma ISO 9060: 2018

	CLASES DE RADÍMETROS (DE BANDA ANCHA EN EL ESPECTRO SOLAR)		
NOMBRE DE LA CLASE	A	B	C
equivalencia con la norma ISO 9060:1990	Estándar Secundario	Primera Clase	Segunda Clase
tiempo de respuesta (estabilización de la medida a un 95% de la respuesta)	< 10 segundos	< 20 segundos	< 30 segundos
zero offset a) respuesta a la radiación térmica neta de -200 W/m ² b) respuesta a un cambio de la temperatura ambiente de 5 °C/h. c) efecto total del zero offset a los dos puntos anteriores (a y b).	± 7 W/m ² ± 2 W/m ² ± 10 W/m ²	± 15 W/m ² ± 4 W/m ² ± 21 W/m ²	± 30 W/m ² ± 8 W/m ² ± 41 W/m ²
estabilidad (porcentaje de cambio anual de la sensibilidad del equipo)	± 0.8 %	± 1.5 %	± 3.0 %
no linealidad (porcentaje de desvío de la sensibilidad a 500 W/m ² , debido a cambios dentro del rango 100-1000 W/m ²)	± 0.5 %	± 1.0 %	± 3.0 %
respuesta direccional (para irradiancia directa) (rango de errores causados al suponer que la sensibilidad en incidencia normal es válida para todas las direcciones cuando se mide desde cualquier dirección (con un ángulo de incidencia de hasta 90° o incluso desde debajo del sensor) un haz de irradiancia directa en incidencia normal de 1000 W/m ²).	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²	± 30 W/m ²
errorpectral (para irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro) (errorpectral observado contra el espectro de irradiancia solar global horizontal definido en la norma ISO 9060:2018)	± 0.5 %	± 1.0 %	± 5.0 %
respuesta a la temperatura (desviación porcentual debida al cambio de la temperatura ambiente en el intervalo de -10°C a 40°C con respecto al valor de la señal a 20°C)	± 1.0 %	± 2.0 %	± 4.0 %
respuesta a la inclinación (desviación porcentual de la sensibilidad a 0° de inclinación (horizontal) debido al cambio en la inclinación de 0° a 180° a 1000 W/m ² de irradiancia)	± 0.5 %	± 2.0 %	± 5.0 %
errores adicionales en la señal	± 2 W/m ²	± 5 W/m ²	± 10 W/m ²

1.7. Puesta en operación e intervenciones en la estación

Se recomienda realizar una prueba integral de la estación de medición y verificaciones de la medida previo a poner en operación una estación de medición. Al final de la instalación o la realización de un mantenimiento, se deben registrar o actualizar todos los metadatos de la estación (ver sección 2.1) y cualquier información auxiliar que sea de utilidad para el uso posterior de la medida registrada. En particular, en el caso de mantenimientos, es de interés registrar la



hora de inicio y fin de la intervención en la estación, el número de serie de todos los equipos, registros fotográficos de la estación y su entorno, y las alteraciones observadas en la estación durante el tiempo de operación entre la visita actual y la anterior.

1.8. Mantenimiento de la estación y de su equipamiento

Toda estación de medición requiere supervisión y mantenimiento continuo, y el registro de la irradiancia solar no es la excepción. La periodicidad del control está relacionada en forma importante con la calidad de las mediciones. Como regla general, cuanto más frecuente es la revisión, más confiable resultan los datos. No es un detalle menor observar que la calidad de las mediciones no queda garantizada sólo por la clasificación del radiómetro utilizado: la incertidumbre de la medición no depende únicamente de las características del instrumento. Los datos provienen de un sistema de medición que incluye al radiómetro, su adquisidor, el régimen de mantenimiento y su periodicidad, la ubicación, y la frecuencia de la calibración. Cada uno de estos elementos añade incertidumbre a la medición, que debe ser minimizada todo lo que sea factible. Toda estación de medición debería contar con una rutina de mantenimiento regular, un plan de mantenimiento anual, y un plan de calibración, y la incertidumbre de la medida tiene una dependencia importante con estos aspectos, además de los relacionados a los equipos y su ubicación.

El mantenimiento regular de la estación en forma apropiada es por tanto un requisito básico para disponer de baja incertidumbre en la medición, establecer su confiabilidad y evaluar su valor. En lo que respecta los controles mínimos que deben realizarse, se pueden señalar las siguientes recomendaciones:

- Control de la nivelación del equipamiento y, en caso que sea necesario, ajustar su posición horizontal. Se recomienda realizar este control con frecuencia diaria (para equipos de calibración) y semanal/mensual (para estaciones de campo o equipos en medición continua, de acuerdo a las posibilidades).
- Control del estado y limpieza de las cúpula de los piranómetros. Frecuencia diaria (calibración) o semanal/mensual (medición continua), y en la mañana previo a la salida del Sol para que no afecte la medida. El estado de limpieza de la cúpula en el caso de piranómetros y de la ventana en el caso de pirhelíómetros es uno de los factores más determinantes de la incertidumbre de la medida, puesto que, sin mantenimiento, se acumula polvo, residuo de partículas (especialmente tras secarse la lluvia o el rocío), telas de araña, etc. Por este motivo si se desea minimizar la incertidumbre, y dependiendo para la aplicación que se usarán las medidas, es recomendable prestar especial atención a la limpieza. Como se mencionó anteriormente, el uso de ventiladores y unidades de calefacción reducen la necesidad de revisión del estado de humedad y suciedad en las cúpulas. Su empleo puede reemplazar la necesidad de un control diario por uno semanal.
- Control de obstrucciones sobre la irradiancia directa en incidencia normal. Las obstrucciones permanentes, en general, no aparecen rápidamente sobre un equipo, por lo que se recomienda revisar las eventuales obstrucciones mediante observación del sitio con frecuencia mensual o

semestral, de acuerdo a las posibilidades. En situaciones específicas, puede ser de interés una mayor frecuencia de control.

- Control de la altura máxima del horizonte. En particular esto requiere la revisión periódica de la altura de los eventuales obstáculos forestales u de otro tipo en las cercanías de la estación.
- Control del estado de los desecantes en aquellos equipos que los tengan (y reemplazo en caso de necesidad). Revisión con frecuencia semanal/mensual. La humedad que se forma en el interior de los sensores es una de las causas más importantes de su deterioro. En el caso de condensación dentro del mismo, el equipo debe ser retirado, secado y recalibrado.
- Control de la hora (reloj) de los adquisidores de datos. Se recomienda mantener una sincronización con frecuencia diaria con servidores de tiempo vía internet. Sistemas de vigilancia de esta sincronización pueden correr en base diaria, semanal, u otra que sea adecuada a criterio del encargado de la estación.
- Visualización de datos con frecuencia al menos diaria (calibración) o diaria/semanal (medición continua), con el objetivo de monitorear que no haya ningún problema por el cual se vayan a perder datos valiosos y, en caso que corresponda, identificarlo y solucionarlo rápidamente. Esto se puede realizar, por ejemplo, con un programa que corra en forma continua y genere una gráfica de visualización accesible con los datos en tiempo real o del/ de los día/s anterior/es.
- Descarga frecuente de los datos almacenados en los adquisidores. Ello permite, al tiempo de monitorear los datos, evitar pérdidas importantes originadas por un mal funcionamiento del datalogger. Esto puede lograrse a través de una estación con envío automático o comunicación remota. De hacerse de forma automática, la frecuencia recomendada es al menos diaria. De hacerse en forma manual, la frecuencia recomendada es al menos semanal. La capacidad de almacenamiento local de datos es también importante y es recomendada. La visualización de los datos, además de su descarga para almacenamiento, es importante para detectar posibles problemas con la medición.
- Control del estado de carga de las fuentes auxiliares de energía de la estación. En el caso de que se utilicen baterías para tal fin, debe considerarse su vida útil y reemplazarlas según las especificaciones antes de que lleguen al límite de ella. Una buena práctica consiste en (en el caso de ser posible) almacenar en el adquisidor, el valor de tensión del banco de baterías auxiliares. Frecuencia diaria/semanal.
- Registro documentado y fechado de tareas de mantenimiento, instalación o de cualquier modificación realizada en la estación de medición (bitácora de la estación).
- Valorar la pertinencia de ubicar en la estación una medida redundante.

El documento "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation" de la OMM constituye una excelente referencia en lo que respecta a la instalación, operación y mantenimiento de las estaciones de medición de la radiación solar.



1.9. Calibración de los equipos

Los radiómetros deben calibrarse regularmente en un centro capacitado en la temática, de solvencia técnica, y que cuente con instrumental de referencia trazable a la referencia radiométrica mundial (WRR, World Radiometric Reference, establecida por el WSG, World Standard Group). Lo recomendable es realizar una calibración anual y no superar nunca un tiempo mayor a los dos años entre calibraciones sucesivas. Los adquisidores de datos, sensores de temperatura, humedad relativa u otros instrumentos de medición relacionados, a las estaciones también deben ser calibrados contra estándares calibrados y trazables y con las mismas recomendaciones de frecuencia. Entre las calibraciones es recomendable realizar verificaciones intermedias, según el esquema de la Figura 1, que pueden resultar en calibraciones más tempranas de los equipos.

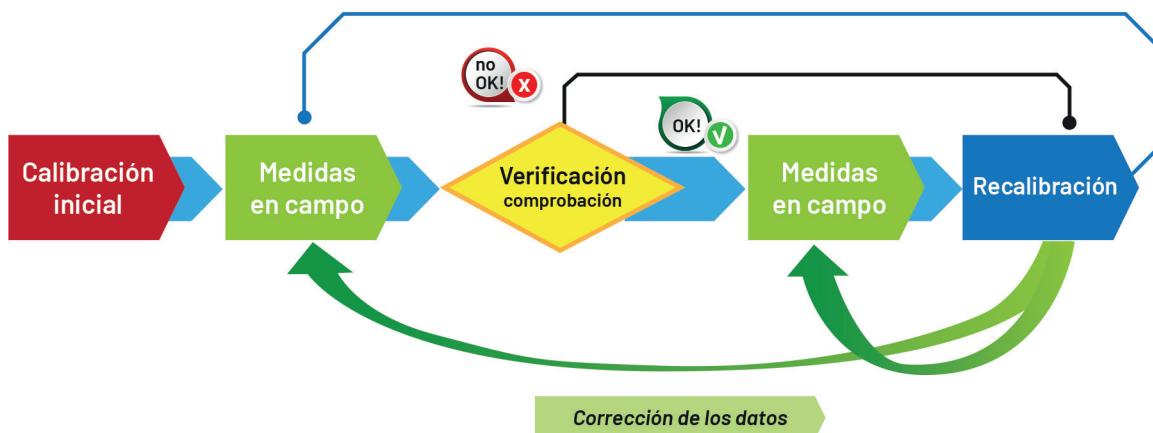


Figura 1: Esquema de verificación de mediciones entre calibraciones de un equipo.

1.10. Trazabilidad de las mediciones de irradiancia solar

La influencia en el tiempo y el clima de la radiación solar y sus posibles fluctuaciones es un campo de investigación desde finales del siglo XIX. Históricamente, la irradiancia solar se consideraba principalmente como una variable meteorológica y, por lo tanto, su lugar natural de estudio y registro continuado estaba al amparo de la Organización Meteorológica Internacional (OMI), creada en 1873, reemplazada en 1950 por la OMM.

Los radiómetros de cavidad absoluta desarrollados a finales de la década de 1960, con alta precisión y estabilidad llevaron a la selección de nuevos patrones de referencia y definición de una nueva escala de irradiancia. Esto permitió el establecimiento de la Referencia Radiométrica Mundial (WRR), definida como el valor medio de 15 radiómetros absolutos de 9 diferentes modelos con una precisión estimada del 0,3%. El WRR fue tomado por la OMM como el estándar primario de referencia para las mediciones de irradiancia solar, y el Physikalisch Meteorologisches Observatorium (PMOD) de Davos fue designado como el Centro Mundial de Radiación (WRC, World Radiation Center), encargado de mantener el Grupo de Estándar Mundial (WSG) de radiómetros de referencia utilizados para materializar el WRR. Cada radiómetro del WSG es una realización práctica de la unidad de



irradiancia (W/m²). Desde entonces, las Campañas de Intercomparación de Pirhelímetros (IPC, International Pyrheliometer Comparison) han sido organizadas cada 5 años por la OMM / PMOD para difundir la referencia WRR y validar la estabilidad del WSG.

Como cualquier otro estándar de referencia en el Sistema Internacional (SI), el WRR debe mostrar estabilidad de largo plazo y debe permitir mediciones mundiales precisas y homogéneas de su magnitud (la irradiancia solar). De esta forma, las mediciones realizadas en diferentes puntos de la Tierra y en diferentes momentos a lo largo del tiempo deben ser comparables y equivalentes. Sin embargo, de acuerdo con los principios del Buró Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), los Institutos Nacionales de Metrología (INM) deben proteger y mantener los estándares primarios. Debido a esto, el Instituto Nacional de Metrología (INM) de Suiza, METAS, nombró a PMOD como *Instituto Designado* y firmó el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con BIPM en 2008. La OMM es entonces equivalente a un Instituto Nacional de Metrología y puede definir sus propios institutos designados para preservar las normas y realizar calibraciones primarias. En virtud de ello, la OMM eligió al WRC / PMOD como *Instituto Designado* para la irradiancia solar y ultravioleta (UV) dentro de su acuerdo.

Luego de la firma de estos acuerdos mutuos, la escala de irradiancia solar basada en WRR se difunde de PMOD / WRC a sensores estándar en los centros radiométricos regionales y nacionales de la OMM, y a los responsables de las estaciones de la Red de Radiación de Superficie de Referencia (Baseline Surface Radiation Network / BSRN), con la estructura formal de BIPM. De esta manera el WRR puede entenderse como la referencia principal en una escala de irradiancia solar, tanto a través de la designación de PMOD por METAS como a través de su designación por OMM (con alcance internacional).





PARTE 2

**REGISTRO DE LAS MEDIDAS Y
METADATOS**

► PARTE 2 - REGISTRO DE LAS MEDIDAS Y METADATOS

2.1. Registro de metadatos

La OMM define a los metadatos como “*los datos sobre los datos*”, entendiéndose como los comentarios, información y las indicaciones que acompañan a los registros meteorológicos adquiridos por una estación de medida. Esta información detalla muchos parámetros sobre cómo fue obtenida la información y en qué normativas se basa, dado que “*los recursos y las circunstancias locales pueden dar lugar a desviaciones con respecto a las normas acordadas en materia de instrumentación y exposición*”. Debido a esto, hasta los cambios respecto a la normativa (por ejemplo en la instalación) deben ser recabados [OMM, 2021].

Los metadatos son de gran importancia, de hecho, son tan importantes como la medida misma. Los metadatos se registran en forma auxiliar al archivo de medidas y, si el registro está correctamente realizado, permiten reconstruir exactamente en qué condiciones se tomó la medida. Nos indican, por ejemplo, si en un momento la medida se cortó por un motivo conocido o desconocido, la duración del fallo, en qué momento se inició y terminó una intervención programada, si la medida está afectada por una sombra conocida y su ubicación geométrica, qué sensor y número de serie tomó los datos y qué trazabilidad tenía, entre otros. En la etapa consecutiva a la toma de datos, que es la depuración o pre-proceso, el operador de los datos necesitará tener la información de los metadatos para poder determinar, si correspondiese, qué datos son válidos y cuáles serán identificados como no válidos. Dado que esta etapa es posterior a la medición, es necesario contar con el registro de los metadatos. Puede ocurrir también de que años más tarde, aún después de haber hecho el pre-proceso, se detecte un error en los datos de un período, y se deba corregir ese error. En ese caso los metadatos ayudarán a comprobar cuál fue el error, corregirlo y evitar la pérdida de datos. Finalmente, para el usuario final de los datos, los metadatos también son imprescindibles, ya que determinarán si los datos son útiles para la aplicación que se les quiere dar o no, por ejemplo, si hubieran sido tomados con un equipo de clase B, pero fueran necesarios datos de un equipo de clase A. Se recomienda llevar un registro al día de los metadatos, y en el caso de los metadatos del tipo historial, que se registren en el mismo momento en el que se da el evento, para evitar olvidos y pérdidas de información.

Los usuarios de las observaciones meteorológicas deben conocer la exposición real de los equipos, el tipo de medición realizada, su ubicación precisa, la condición del instrumento de medición, su funcionamiento y las circunstancias en las que fueron obtenidos los datos. Los usuarios normalmente representan un gran grupo interdisciplinario que necesitan saber esta información para sus fines, ya sea público general, profesionales vinculados a actividades productivas, institución académica, pronosticadores y/o encargados de la estación. En lo que refiere a la radiación solar, los metadatos son un aspecto clave para poder asignar una incertidumbre real (o típica) a la medición.



Muchos servicios meteorológicos u organismos encargados de la administración de redes han ido desarrollando técnicas en el registro de los metadatos con el fin de respaldar la información, la utilidad del dato y mejorar el mantenimiento de la red completa. En última instancia, todos estos aspectos hacen que la incertidumbre de la información registrada sea menor, siendo más fiable y, por tanto, útil. En la siguiente tabla se presentan las categorías de metadatos del WIGOS (World Meteorological Organization Integrated Global Observing System)[Norma 1192 WIGOS].

Tabla 2: Categorías de metadatos WIGOS

Categoría	Descripción
1. Variable observada	Indica las características básicas de la variable observada y las series de datos resultantes. Incluye un elemento que describe la representatividad espacial así como el comportamiento biogeofísico que la propia observación específica.
2. Propósito de la observación	Indica las principales esferas de aplicación de la observación y los programas y las redes observación a los que está asociada.
3. Estación / Plataforma	Indica la instalación de la observación, como las estaciones fijas, los equipos móviles o las plataformas de teledetección, desde la que se lleva a cabo la observación.
4. Entorno	Describe el medio geográfico en el que se realiza la observación. También proporciona un elemento no estructurado de metainformación complementaria que se considera de importancia para la utilización adecuada de las observaciones y que no figura en ninguna otra sección de la presente norma.
5. Instrumentos y métodos de observación	Indica el método de observación y describe las características de los instrumentos utilizados para llevarla a cabo. Esta categoría debe aparecer repetida si se utilizan varios instrumentos para generar la observación.
6. Muestreo	Indica cómo se utiliza el muestreo o análisis para obtener la observación notificada o cómo se recoge una muestra.
7. Proceso y notificación de datos	Indica cómo se convierten los datos brutos en las variables observadas y cómo se comunican a los usuarios.
8. Calidad de los datos	Indica la calidad de los datos y la trazabilidad de la observación.
9. Propiedad y política de datos	Indica quién llevó a cabo la observación y quién es su propietario.
10. Datos de contacto	Indica dónde se puede obtener información sobre la observación o la serie de datos.

Los parámetros básicos que se deben recabar y estar presentes en toda ficha de metadatos, de acuerdo a la OMM en su Guía Nro. 8 y sugeridas por los Servicios Meteorológicos e instituciones internacionales, son: (a) Metadatos Generales, (b) Metadatos Geográficos, (c) Metadatos Técnicos, y (d) Metadatos Visuales, los que se describen detalladamente en apartados separados a continuación.



Las siguientes son algunas de las fuentes de información relevantes para llevar adelante el trabajo de supervisión de las estaciones:

a) Metadatos Generales: Describen los datos de la estación en términos de su situación y correspondiente identificación.

1. Estado de operación: Se especifica si la estación, a la fecha de actualización de los metadatos, está operativa o no, entendiéndose como operatividad si transmite datos y se encuentra funcionando con normalidad.:

2. Tipo de estación: La función por defecto que cumple en términos de la red a la que pertenece: sinóptica, agrometeorológica, hidrometeorológica, climatológica, de montaña, embarcada, boyas, etc.

3. Nombre y número de la estación: Nombres con la que se la conoce dentro de la red, del organismo, y el declarado para el sistema OSCAR¹ (Observing Systems Capability Analysis and Review tool)[OMM, 2023], si correspondiera.

4. Organismo responsable: Organismo encargado de la administración y funcionamiento de la estación. Se puede dar el caso que tanto la supervisión y el mantenimiento de la estación esté a cargo de una sola entidad o que el mantenimiento lo haga una empresa o institución particular externa destinada a dicha tarea pero la administración general a otra.

5. Contactos: Persona responsable y sus datos de contacto para cualquier eventualidad o seguimiento de la estación; número de teléfono, dirección, email, país, provincia/estado y localidad, etc. Toda acción de mantenimiento preventivo, limpieza, reemplazo, reparación, solicitud de verificación in situ y permisos de acceso será canalizada a través de esta persona.

6. Constancia de fechas: Se debe tomar registro de las fechas de instalación, operación, reemplazo y última visita, dado que son útiles para evaluar y programar futuras inspecciones, cambio de sensores y análisis de los datos registrados.

7. Cambios de sitio: Si la estación fue desplazada y reinstalada en otro sector dentro del campo de observación o a una nueva ubicación en la zona, debe quedar registrada la fecha de cambio, métodos, cambios de instrumental, alimentación, etc., como también realizar nuevamente el análisis del entorno y documentarlo debidamente.

b) Metadatos geográficos: Los metadatos sobre información geográfica brindan información de la zona donde se encuentra instalada la estación y describe cómo es el entorno en donde se mide.

1. Coordenadas geográficas: Nos dan la posición geográfica(latitud y longitud) donde se encuentra la estación. Este metadato es de carácter primordial, y debe ser adquirido con una precisión de al menos 5 (cinco) decimales en formato grado decimal, cumpliendo con la última normativa de la OMM para el sistema OSCAR. La utilización de aplicaciones como Google Earth, otros sistemas de información geográfica o aplicaciones de telefonía celular para la adquisición de coordenadas y alturas son aproximadas en comparación con un gps de mano o diferencial. Los programas pueden ser utilizados como referencia, debido a que en general se desconoce su grado de exactitud.

1. OSCAR/Surface es una plataforma de la OMM que facilita la búsqueda rápida de metadatos de una estación, por elementos específicos como variables, instrumentos, detallando las variables físicas en cuanto a su resolución vertical y horizontal, incertidumbre, ciclo de observación, etc.



2. Altura de la estación y sensores: Se debe tomar nota de la altura de la estación en términos de elevación del suelo respecto del nivel del mar y la altura particular de cada uno de los sensores.

3. Uso de suelo(0m-100m, 100m-1km, 1km-10km): Muchas veces el entorno varía sensiblemente con la distancia en términos demográficos por lo que hay que tomar nota de estas variaciones en distintos rangos fijos de distancia. El uso puede ser urbano, de cultivo, construcciones, industrias cercanas, montes, lagos, lagunas, montañas, etc., que pueden determinar o influir en las mediciones.

4. Tipo de superficie y tipo de suelo: Se tomará nota del tipo de suelo, ya sea tierra, arenilla, de cultivo, natural, artificial, etc., como también la superficie y su inclinación general y sobre distintas direcciones. Teniendo en cuenta que la OMM indica que el suelo y sitio donde se encuentra instalada la estación debe ser representativo del lugar en donde se mide, toda desviación como suelos artificiales que modifican las condiciones naturales de medición debe ser también registrada en estos metadatos.

5. Descripción de los obstáculos cercanos a la estación: Descripción de la distancia, dirección, elevación y ángulos de cualquier obstáculo, ya sean árboles, edificios, cuerpos de agua, industrias, etc.

6. Cambios a futuro o recientes: Deben detallarse cambios del entorno próximo y zonal, en términos de desplazamiento de obstáculos (árboles, construcciones, actividades en el sector, etc.) o cambios demográficos (intensificación de tránsito, construcción de rutas o caminos, instalación de fábricas, procesos de deforestación y/o forestación, etc.).

c) Metadatos técnicos: Estos metadatos describen las características técnicas, de funcionamiento y de calidad/gama del instrumental, sensores y elementos que componen a la estación.

1. Marca y modelo: Estos metadatos abarcan la marca y modelo de cada parte que compone a la estación, principalmente sensores y adquisidores/datalogger. Es importante también tomar registro de los periféricos tales como torre o sistemas de alimentación. El avance tecnológico y la amplia gama de propuestas comerciales existentes fuerzan en ocasiones a que se den casos donde todas las partes que componen a la estación sean de distintas marcas y/o modelos.

2. Fichas y certificados de contraste/calibración: Las fichas y certificados de contraste/calibración hacen referencia a las características de cada equipo y las pruebas de laboratorio que fueron realizadas para garantizarlas. Los certificados son preparados y enviados junto con el instrumento por el fabricante o por la institución responsable de la calibración, y entregados junto con el equipo. Los mismos deben contener las pruebas realizadas y sus resultados, útiles para ponderar las mediciones que realice el sensor una vez instalado, como también información tal como números de serie, modelo, rango de medición, sensibilidad, unidad de medida, exactitud, incertidumbre, temperatura de trabajo, tiempo de respuesta, coeficientes específicos, fórmula de cálculo, modo de medición, etc.

3. Fecha de contraste/calibración: Fecha en la que fue contrastado/calibrado un equipo por el fabricante o por el organismo responsable, y fecha en la que se la contrastó con instrumentos patrones *in situ*, si correspondiera. Este registro es utilizado para evaluar posibles fallas o



desgastes, proveer información a la evaluación de la incertidumbre de medición o planificar con antelación cambios periódicos asegurando la calidad de los datos adquiridos.

4. Reemplazo de instrumental y periféricos: Debe tomarse debida nota de cuando se realice un cambio de un sensor o *datalogger*, dado que esto afecta directamente a la serie de datos históricos. Se debe documentar el tipo, principio de funcionamiento, modelo, marca, procedimiento de reemplazo y fecha, entre otros metadatos requeridos.

5. Sistema de transmisión: El método o los métodos con los que la estación transmite la información (radiofrecuencia, telefonía celular, internet, satélite, red P2P, FTP, etc.), indicando estado, calidad y posibilidad de cambios a futuro.

6. Almacenamiento interno de datos: El *datalogger* o el sistema de transmisión pueden o no contar de memoria de almacenamiento de los datos medidos. Esto es importante dado que a la hora de la recuperación de los datos, por motivo de fallas en las transmisiones, se pueden recuperar los mismos a tiempo diferidos. Esta capacidad depende puntualmente de cada estación y tecnología utilizada. Naturalmente, es recomendable usar equipos con almacenamiento interno de respaldo para atender eventualidades con el registro de datos.

7. Suministro de energía eléctrica: Se registrará el tipo de suministro de energía eléctrica que posibilita el funcionamiento de la estación, pudiendo ser red local, batería y/o panel solar con regulador, entre otros.

8. Frecuencia de observación y transmisión: La estación puede ser configurada para realizar las tareas de observar, almacenar los datos y transmitir a distintos intervalos de tiempo, por ejemplo, puede medir cada 1 minuto, guardarla cada 5 y transmitir cada 10, de acuerdo a la programación realizada. A efectos de la medida de radiación solar se recomienda registrar los datos en forma minutal como promedio de un muestreo sub-minutal del orden de segundos (frecuencia recomendada entre 0.1 Hz y 1 Hz).

d) Metadatos visuales: Los metadatos visuales se refieren a toda imagen que pueda darnos más detalles y complementar la interpretación de los datos y poder ponderarlos en forma más completa. Con los avances tecnológicos estos metadatos pueden tomar la forma de imágenes de alta definición, imágenes satelitales, planos de planta o videos. Todos deben ser guardados en formato digital con nombres que detallen la estación a la cual hacen referencia, fecha de la captura, dirección a cuál fue tomada y orientación.

1. Fotos y videos de sitio: Las fotos del sitio muestran a la estación completa donde se ve la estructura completa desde la base que soporta los radiómetros junto a su entorno más próximo. Estas fotos son ocho capturas tomadas desde los ocho puntos cardinales siguiendo el sentido horario (N, NE, E, SE, S, SO, O y NO). La utilidad de estas fotos en el momento de instalación y en cada visita se deben tomar fotos de la estación de su condición inicial y su progresivo estado de deterioro para evaluaciones de mantenimiento requerido. Se recomienda también registrar fotos del entorno de la estación hacia los mismos ocho puntos cardinales.

2. Fotos de instrumental: Junto a las fotos de todo el instrumental de la estación, que incluyen capturas individuales de los sensores, se sumarán fotografías de los soportes y mesadas, estado de los cables, soportes, etc.



3. Fotos aéreas: A través de “Google Earth” o herramienta similar de imágenes satelitales, se puede obtener una visión aérea de la estación y los alrededores a fin de realizar un análisis de la demografía cercana, zona de campos, ciudades, ríos, lagos, industrias, montañas, valles, etc. Se pueden trazar círculos concéntricos para realizar análisis en las cercanías a distintas distancias.

2.2. Registro de la medición

Existen varias consideraciones a tener en cuenta a la hora de realizar el registro de la medición. Éstas dependen, entre otras, del tipo y cantidad de instrumental del que se disponga, de la capacidad de almacenamiento y transmisión de los datos, del adquisidor utilizado, del uso de los datos, etc. Si bien cada institución posee su propia configuración para el registro y almacenamiento de los datos, en esta subsección se analizarán aspectos básicos a la hora de registrar los datos de irradiancia solar.

En la práctica de la medición de irradiancia solar operativa es más frecuente encontrar estaciones que obtengan datos de irradiancia global en plano horizontal (GHI) debido a la dificultad que conlleva la medición de irradiancia solar difusa en plano horizontal (DHI) y la irradiancia solar directa en incidencia normal (DNI). Sin embargo, todas las consideraciones analizadas aquí son igualmente válidas para estas otras componentes. Tal como se indicó en la sección 1.5, siempre teniendo en cuenta la respuesta del registrador y del radiómetro utilizado, la frecuencia recomendada de muestreo corresponde a valores entre 0.1Hz y 1 Hz con registro de datos minutales. Sin embargo, dependiendo del análisis que se desee realizar con los datos o el uso final que tendrán, los datos se pueden registrar en intervalos de tiempo menores al minuto teniendo en cuenta que esto conlleva un aumento en el costo de transferencia de datos y su almacenamiento. Asimismo, algunos registradores permiten, además de guardar el dato correspondiente al parámetro, la adquisición del valor máximo, mínimo y desviación estándar del valor adquirido para el período de guardado. Siempre que el registrador y las características de la estación de medición lo permitan, es recomendable adquirir esta información asociada al parámetro principal para futuros análisis.

Algunos registradores tienen la capacidad de incorporar algoritmos capaces de registrar el dato en unidades radiométricas (W/m^2) a través de la incorporación del factor de calibración del radiómetro utilizado (y no la señal original en mV, mA u otros). Dependiendo del principio de funcionamiento del radiómetro utilizado (fotovoltaico o piranométrico) es recomendable el almacenamiento de los datos crudos en su unidad de base (por ejemplo, en mV para los piranómetros sin transmisor integrado). Esto implica trabajar en distintos niveles de procesamiento del dato, partiendo desde un dato crudo inalterable (nivel 0) y pasando por distintos niveles o versiones de los datos a través de distintos procesamientos. Por esto mismo, es deseable que la programación del datalogger no elimine datos en función de criterios establecidos sino que se realice la adquisición de los datos sin ningún tipo de filtro. Algunos filtros para asegurar la calidad de los datos se presentan en la Sección 4 del presente documento. En especial, es importante que el adquisidor registre los valores nocturnos y diurnos en forma inalterada.

Al momento de establecer los parámetros y el rango de medición, debe tenerse en cuenta la sensibilidad de los radiómetros a conectar en el datalogger con la finalidad de no perder datos



por estar fuera de rango o perder resolución por dar un rango amplio de entrada. Al definir esta configuración no deben perderse de vista los eventos de sobre-irradiancia, asociados a un aumento temporal y de corta duración (1-3 minutos) de la irradiancia a nivel de suelo debido a configuraciones nubosas particulares en el cielo. Este fenómeno, conocido como *cloud enhancement*, puede superar los 1600 W/m² y es frecuente en climas con nubosidad intermitente. Su correcto registro es de gran importancia para una adecuada medición de la irradiancia solar y deben ser almacenados en la base de datos para su análisis posterior.

Ya sea que el dato crudo se envíe en tiempo real en algún servidor institucional, o que el mismo se guarde en tiempo diferido, o en una PC local, no es deseable que el almacenamiento de la información se realice en un sitio al que personas no autorizadas dentro de la institución tengan acceso.

2.3. Formatos sugeridos

Para facilitar colaboraciones técnico-científicas e intercambio regional de información, esta sección busca establecer algunos criterios generales comunes de formato a utilizar para compartir datos medidos de radiación solar. Esta propuesta toma en consideración criterios basados en el formato utilizado por la BSRN. Si bien el formato sugerido para los archivos considera la posibilidad de pasos temporales por debajo del minuto o incluso valores 5-min o 10-min, la frecuencia de datos sugerida para compartir los datos es de 1-min.

Cada archivo con datos para compartir contendrá la información mensual de todos los días del mes correspondiente, incluyendo datos diurnos y nocturnos. Acompañando los archivos de datos debe ir un archivo con los metadatos, donde se indiquen todas las consideraciones correspondientes a la estación y mediciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora de utilizar los datos. Asimismo, además del envío de los datos y del metadato, podrán utilizarse filtros como los propuestos en la Sección 4. Al utilizar estos filtros no se eliminan datos del registro minutal, sino que se generará un archivo adicional con el resultado de cada filtro para cada parámetro y cada minuto que deberá compartirse junto con los datos. Con la finalidad de facilitar el intercambio de información, el archivo de control de calidad deberá estar acompañado de un archivo que explice los filtros utilizados.

a) Nombre

El archivo con los datos correspondientes al mes tendrá una extensión .csv (*comma separated values*) y el nombre de dicho archivo tendrá en cuenta el nombre de la estación en la cual se obtuvieron los datos y la fecha de la siguiente manera:

Estacion_YYYYMM.csv

donde YYYY expresa el año y MM el mes correspondiente (01-12). Dado que no existe un listado estandarizado de nombres de estaciones que reporten a una única base de datos para la región, no es posible asignar de antemano abreviaturas para las estaciones por lo que el nombre de la estación será el que cada institución defina. Los nombres de los archivos no deberán contener espacios (caracter espacio), sustituyendo éstos por guiones bajos.



b) Parámetros

Con la finalidad de facilitar el intercambio de información, el archivo correspondiente a los datos mensuales considera la incorporación de todas las magnitudes de radiación solar relevantes en este documento (GHI, DHI, DNI). Asimismo, si bien BSRN considera la inclusión de parámetros meteorológicos convencionales en los archivos, no siempre es posible contar con estas mediciones en el sitio en el que se monitorea la irradiancia solar, por lo que no serán tenidas en cuenta las mediciones convencionales para el archivo radiométrico a especificar. En caso de ser necesario, esta información deberá ser presentada en un archivo adicional.

Se deben reportar los 1440 valores minutales correspondientes a cada día, teniendo el cuidado de colocar el valor -999, NA, o NaN, para datos faltantes. En caso de compartir uno o dos parámetros únicamente, entonces todas las columnas y filas correspondientes a la/s componente/s faltante/s deberán presentar el valor escogido para el dato faltante. Asimismo, los valores de irradiancia de cualquiera de las magnitudes indicadas deberán ser presentados en unidades radiométricas (W/m^2) y con al menos un dígito decimal.

El formato puede ser extendido a otras magnitudes de radiación, por ejemplo, las de carácter espectral, como radiación ultravioleta(UV), fotosintéticamente activa(PAR) o infrarroja(IR). En estos casos, se deberá prestar especial atención a la unidad escogida y la cantidad de dígitos decimales.

c) Estructura

La etiqueta temporal a utilizar en el archivo a compartir debe estar en hora referida al UTC local sin considerar cambios de horario de verano, utilizado en determinados períodos en algunos países. El archivo deberá contar con un encabezado de manera tal de identificar fácilmente los parámetros considerados. Con la idea de avanzar hacia un encabezado estándar se presenta la siguiente propuesta:

Datetime

GHI_promedio[W/m**2],GHI_max[W/m**2],GHI_min[W/m**2],GHI_stddev[W/m**2],
DHI_promedio[W/m**2],DHI_max[W/m**2],DHI_min[W/m**2],DHI_stddev[W/m**2],
DNI_promedio[W/m**2],DNI_max[W/m**2],DNI_min[W/m**2],DNI_stddev[W/m**2]

El registro y reporte de los valores minutales max, min y stddev son a criterio de cada institución o encargado de la estación de medición. El formato de la etiqueta temporal deberá seguir alguna de las convenciones POSIX, de fácil entendimiento y conversión en sistemas computacionales de procesamiento y visualización de datos. La etiqueta debe ser tal que indique la fecha, incluyendo año, mes y día del mes, y la hora del día indicando al menos hasta el minuto. Se sugiere especialmente el formato YYYY-MM-DD HH:mm:ss, pudiendo indicar además el UTC local asociado a la etiqueta.





PARTE 3

CALIBRACIÓN Y TRAZABILIDAD

► PARTE 3 – CALIBRACIÓN Y TRAZABILIDAD

3.1. Programa de calibración de los equipos

Las instituciones, centros, o laboratorios que administren redes de medición deben contar con un inventario de equipos detallado, su seguimiento, y un programa de calibración de los mismos. Los radiómetros de las estaciones deben ser calibrados al menos cada dos años. En el caso de los radiómetros con sensor fotovoltaico, es recomendable realizar su calibración en base anual e incluso realizar una primera calibración antes de su puesta a medir en campo. La calibración debe ser realizada en un laboratorio que asegure la trazabilidad de la medida al WSG. Se debe velar también por la trazabilidad de las medidas eléctricas del adquisidor de la estación.

Las normas reconocidas en la actualidad para realizar la calibración de radiómetros de banda ancha en el espectro solar, dependiendo del tipo de instrumento, son:

- ISO 9847:2023 "Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer".
- ISO 9846:1993 "Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer".
- ISO 9059:1990 "Solar energy - Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer".

Se debe notar la reciente actualización de la norma ISO 9847 a su versión de 2023, conteniendo algunas actualizaciones metodológicas respecto a su versión anterior de 1992, en particular, en lo que refiere al procedimiento de cálculo de la nueva sensibilidad, que permite la calibración de salidas analógicas y digitales de los instrumentos. Los laboratorios de calibración deben informar qué salida del equipo son capaces de calibrar y con qué incertidumbre. La calibración sólo puede ser realizada contra un instrumento de jerarquía superior, que debe ser indicado por el laboratorio a cargo de la calibración. El resultado de la calibración debe indicar la nueva sensibilidad del equipo (o factor de calibración) y su incertidumbre, además de la información requerida en cada normativa.

Se recomienda que el registro de los instrumentos de medida cuente con la siguiente información: marca, modelo, número de serie, fecha de adquisición, histórico de calibración (fecha, sensibilidad, incertidumbre, laboratorio a cargo, etc.), historial de estados del equipo y ubicaciones, estado y ubicación actual, e información administrativa que pueda ser de utilidad (factura, información del proceso de compra, información del proveedor, información aduanera relevante, etc.).

Se recomienda que el plan de calibración cuente con una planificación y seguimiento para las fechas de calibración de cada equipo que está involucrado con la medición de la radiación en territorio. Esto debe incluir a los equipos que están en servicio en campo y también a los equipos que están de respaldo. Se recomienda tener una serie de equipos de respaldo (la cantidad depende del tamaño de la red y de las capacidades de la institución a cargo de la red de medida) de modo de atender imprevistos y de poder diseñar un plan de recambio eficiente de los equipos para su calibración (que permita optimizar la cantidad de salidas de campo y los recursos humanos involucrados).



3.2. Recomendaciones para laboratorios de calibración en la región

El costo para la industria solar de enviar los radiómetros a calibrar a laboratorios en Europa o EEUU hace poco conveniente o inviable la práctica de calibrar los equipos de medición cada dos años, como es la recomendación general para la medición de la radiación solar en los proyectos solares de porte, además de para las redes de medición. A la fecha no hay en Latinoamérica ningún laboratorio acreditado para la calibración de radiómetros de banda ancha en el espectro solar según la norma ISO/IEC 17025:2017 “*Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*”. Existen, no obstante, laboratorios especializados en la medición de la radiación solar que proveen este servicio según las normas ISO vigentes para esta calibración, con radiómetros de respuesta espectral plana, Clase A (ver Tabla 1), y trazables al WSG, y procedimientos técnicos adecuados, pero que aún no han completado o iniciado el proceso de acreditación. Por consiguiente, no existe ningún centro de referencia regional, con capacidades, servicios e instancias de calibración colaborativas similares a las que se observan en otras regiones (por ejemplo, en el WRC/PMOD y NREL). Los laboratorios existentes en Argentina (SMN y GERSolar/UNLu), Brasil (USP), y Uruguay (LES/Udelar) están ubicados dentro de instituciones públicas y/o académicas, y se encuentran desarrollando estas capacidades. Estos laboratorios son pocos de cara al desarrollo de la energía solar en Latinoamérica, no hay a la fecha una jerarquía de trazabilidad establecida entre ellos, y cubren pocos países. Esta subsección busca brindar recomendaciones y sugerencias para instituciones, centros o laboratorios que busquen desarrollar estas capacidades de calibración. Las consideraciones que se incluyen a continuación tienen un foco técnico. Naturalmente, el final del proceso de construcción y desarrollo de estas capacidades está dado por la obtención y mantenimiento en el tiempo de la acreditación ISO/IEC 17025:2017, lo que incluye no sólo demostrar y sostener capacidades técnicas, sino también de gestión y administración. El foco de la descripción se pone también en los ensayos *outdoor* debido a la experiencia existente en la región y a una valoración positiva sobre las bondades de la calibración a Sol real (en particular, en lo que refiere a la utilización de un espectro solar real a nivel de suelo y de un funcionamiento de los equipos en condiciones similares a las de la medición en campo durante la calibración). No obstante, no se deben ignorar las bondades de la calibración *indoor*, asociadas, por ejemplo, a la ampliación del volumen de equipos que un laboratorio es capaz de calibrar. Este segundo tipo de calibración no se discute en este documento.

a) Capacidades sugeridas para el personal técnico y las instalaciones:

- Calificación del personal con conocimiento y experiencia comprobada en la medición de la radiación solar en exteriores (*outdoor*). Esto generalmente requiere poder demostrar las siguientes actividades:

- La realización o participación en la calibración de radiómetros demostradas a través de informes o certificados de calibración con sensibilidad e incertidumbre asignada.
- Experiencia en la adquisición de medidas continuas de radiación solar que incluyan el uso y mantenimiento de sistemas de seguimiento solar de precisión y sean de calidad compatible con los criterios de la BSRN.
- Participación en talleres de formación específica en calibración de piranómetros o pirhelíometros, y especialmente en intercomparaciones a nivel nacional, regional o internacional



entre laboratorios especializados de calibración de radiómetros bajo normativa ISO vigente, y siempre que los resultados de dicha participación (procedimiento, mediciones, sensibilidad determinada, incertidumbre informada) estén debidamente documentados en reportes técnicos firmados y hayan participado instituciones independientes.

- Experiencia en la aplicación de normas de calibración de radiómetros. Esto se puede demostrar a partir de la realización o participación directa en la calibración de radiómetros outdoor bajo alguna de las normas vigentes, demostrables con informes o certificados de calibración emitidos de acuerdo a lo establecido en la normativa. Adicionalmente, se podría demostrar experiencia con métodos de calibración alternativos documentados a través de reportes técnicos especializados, informes de validación de métodos, o publicaciones de carácter científico.
- Contar con instalaciones y equipamiento de calibración (*outdoor*) dedicadas y adecuadas para la tarea específica. Esto las siguientes recomendaciones:

- Que la bancada de calibración esté ubicada en un entorno no urbano, con atmósfera limpia (pocas fuentes de polvo en la zona) y fuera de la influencia del efecto de las concentraciones de aerosoles atmosféricos, típicas de las zonas industrializadas o de alta densidad urbana [OMM, 2021; McArthur, 2005].
- Que la bancada de calibración cuente con horizonte despejado (sin obstáculos por encima de 5 grados en el rango azimutal de salida y puesta del Sol que puedan ocasionar sombras de cualquier tipo sobre los instrumentos), sin superficies planas reflectivas cercanas, que asegure la estabilidad de los instrumentos en plano horizontal con tolerancia de +/- 0.3 grado incluso durante operaciones de mantenimiento (para ello debe estar aislada mecánicamente de posibles vibraciones y ser lo bastante robusta para que la estabilidad no sea afectada por vientos moderados) [OMM, 2021, Sec. 7.3.3; McArthur, 2005, Sec. 3.1]. Notar que garantizar la horizontalidad de los equipos requiere verificación por inclinómetros, y que la nueva norma de calibración ISO 9847:2023 requiere coplanaridad de las mediciones, lo que puede requerir el uso de bases específicas para cada instrumento.
- Que la bancada de calibración esté conectada a tierra y protegida de las descargas atmosféricas. Se recomiendan también sistemas de protección contra ruido y picos en línea eléctrica(descargadores rápidos en el tablero eléctrico)adecuado para evitar daños irreversibles a los instrumentos en la eventualidad de tormenta eléctrica repentina.
- Contar con registradores automáticos, confiables y con precisión mejor que 0.05% de la lectura en la medida de microvoltajes en la escala de 10 mV operando a temperaturas de hasta 65 oC [ISO 9847:1992; ISO 9059:1990]. Los equipos de registro deben contar con la calibración de los canales de adquisición utilizados. Un único sistema de registro es recomendado o, en su defecto, la aplicación de una sincronización fina de relojes y etiquetas temporales de muestreo y registro.
- Contar con sistemas de soporte(UPS, fuentes DC, etc)y software informático adecuados para la tarea, que permita procesar series minutales o sub-minutales de irradiancia solar de acuerdo a las normas que se apliquen.
- Contar con las capacidades para medir y registrar las variables auxiliares necesarias para el procedimiento de calibración: DHI, temperatura ambiente y humedad relativa, u otras que se



puedan registrar (velocidad y dirección de viento, presión atmosférica, etc.). Los requerimientos de calibración se aplican también a los sensores de medida auxiliar y sus sistemas de registro.

b) Capacidades adicionales sugeridas

- Contar con otros equipos de calidad clase A de respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018, que puedan oficiar como verificación adicional de las calibraciones de los equipos de referencia y de la calibración de piranómetros.
- Contar con un sistema de seguimiento solar de precisión (desvíos menores a 0.7 grados) que permita montar instrumentos de referencia y al menos dos pirheliómetros de referencia adicionales [ISO 9059:1990]. En caso de que el laboratorio quiera calibrar pirheliómetros, o utilizar la norma de calibración de piranómetros por comparación con un pirheliómetro de referencia, esta capacidad es necesaria.
- Contar con al menos dos pirheliómetros y dos piranómetros de referencia de calidad clase A de respuesta espectral plana (según la norma ISO 9060:2018). Estos instrumentos deben estar guardados en un sitio cerrado y oscuro con condiciones controladas de acceso y de temperatura y humedad. Se requieren dos equipos de referencia de cada tipo para poder realizar verificaciones regulares entre la medida de ambos equipos con una frecuencia al menos anual.
- Contar con personal técnico con experiencia en la medida espectral de radiación solar, documentado a través de reportes o informes en el área.
- Contar con otros trabajos documentados (reportes, publicaciones, patentes, desarrollos tecnológicos) sobre el equipamiento y las distintas formas de medición de la radiación solar.
- Acceso a internet en el sitio de medición para monitoreo remoto de las medidas.

c) Sobre la acreditación ISO/IEC 17025:2017

Se sugiere a los laboratorios interesados en el desarrollo de capacidades de calibración de radiómetros de banda ancha en el espectro solar que inicien el proceso por la generación de capacidades técnicas. Certo volumen de experiencia previa acumulada en la realización de las calibraciones es recomendable antes de iniciar el camino hacia la acreditación. La implementación de un sistema de calidad, en particular, en lo que refiere a documentación de procedimientos, volumen de registros, necesidades auditoría interna y externa, y la verificación periódica del instrumental, no deben ser subestimados, ni en la necesidad de recursos humanos para la tarea ni en los costos asociados. Esto hace que la decisión de avanzar en esta dirección deba contar con información y experiencia, para ser tomada con seriedad. Avanzar a la acreditación requiere contar con procedimientos redactados sobre la operativa del laboratorio, de diversos aspectos de gestión interna y ante terceros, y de la realización de la calibración, entre otros, y desplegar diversos registros que demuestren que los procedimientos se cumplen cabalmente, lo que requiere disponer de personal técnico y administrativo dedicado a la tarea. Por otro lado, un laboratorio no puede dar trazabilidad formal a sus calibraciones sin previamente demostrar plenas competencias de acuerdo a la norma ISO/IEC 17025:2017 ante un organismo de acreditación. Más aún, la implementación de un sistema de calidad de acuerdo a esta norma permite dar garantías de tercera parte sobre la confiabilidad de las calibraciones realizadas. Esto es importante en todos los casos que se provee



un servicio a terceros, pero muy especialmente cuando un laboratorio es responsable de calibrar una proporción grande de los radiómetros que miden radiación solar en un territorio o en un país, para todo tipo de fines. Esta es la situación más probable para el desarrollo de estas capacidades en varias partes de Latinoamérica.

3.3. Características esperadas de un centro de calibración regional

Naturalmente, un laboratorio que aspire a oficiar como centro de calibración regional para radiómetros de banda ancha en el espectro solar debe estar acreditado según la norma ISO/IEC 17025:2017. Es deseable también que dicho centro haya demostrado que puede mantener esta acreditación en el tiempo. Un laboratorio de estas características permitiría a los laboratorios de la región calibrar sus equipos de referencia en él, evitando los elevados costos de enviar los equipos a calibrar en el WRC/PMOD y viabilizando que surjan nuevos laboratorios de calibración en cada país (de alcance nacional, provincial, o estadual, según corresponda). Un centro regional es también la oportunidad de generar otras dinámicas en torno a la medida de radiación solar, profesionales y científicas, como se observan en las instancias de calibración colaborativa organizadas por el WRC/PMOD y el NREL. Por tanto, se describen a continuación algunas características sugeridas para un centro regional con dicha misión, como guía para las instituciones interesadas en desarrollar esta capacidad.

- Las Instituciones que oficen como referencia para la región deberán entregar un certificado de calibración que incluya sensibilidad, incertidumbre y otros datos requeridos de acuerdo a las normas vigentes. A pedido de los laboratorios/instituciones de calibración, deberá entregar además las medidas registradas durante el proceso de calibración de los equipos propios enviados a calibrar y del equipo de referencia utilizado. En particular, se deben entregar las series originales de medidas de irradiancia directa, global y difusa, del equipo a calibrar y de los equipos de referencia, y las medidas auxiliares que hayan sido registradas (temperatura, velocidad y dirección de viento, etc.). Se deberá entregar la información de acuerdo a su registro original en el adquisidor y la información necesaria para que cada laboratorio, si así lo desea, aplique el procedimiento de calibración sobre los datos. Esto permite a los laboratorios de calibración verificar sus propios procedimientos de cálculo. Los equipos de referencia se deben especificar en todos los casos (marca, modelo y último certificado de calibración).

- Las Instituciones que oficen como referencia regional deberán asegurar la sostenibilidad técnica del servicio de calibración regional de radiómetros en el espectro solar. Esto incluye mantener el servicio disponible para la región a través del mantenimiento de las capacidades técnicas a nivel de equipamiento, infraestructura y RRHH, mantener la acreditación ISO/IEC 17025:2017 para este servicio en particular y participar, al menos cada cinco años, con sus equipos de referencia de intercomparaciones internacionales en el WRC/PMOD o el NREL. Sus equipos de referencia deben ser de la más alta jerarquía.

- Con periodicidad de al menos 5 años, las instituciones que oficen como referencia, deberán organizar una intercomparación regional abierta y gratuita a los laboratorios de calibración nacional que deseen participar. Los costos de viaje y estadía en estos eventos serán por cuenta de los participantes. Cada participante deberá contar con sus equipos de medida y adquisición



de datos y, en caso de usar pirheliómetros, consultar si existe disponibilidad en los seguidores solares disponibles o traer el propio. El alcance de la actividad (piranómetros, pirheliómetros, etc.) y su organización (fechas, requerimientos para participar, protocolos de trabajo, actividades paralelas, etc.) estará definido previamente por la/las institución/es organizadora/s. Luego, estas instituciones liderarán la producción de un único informe técnico (en conjunto con los participantes) de la intercomparación realizada.





PARTE 4
CONTROL DE CALIDAD



PARTE 4 - CONTROL DE CALIDAD

Obtener registros de buena calidad de irradiancia solar con frecuencia minutal durante varios años es un desafío considerable, que implica un gran esfuerzo logístico que debe sostenerse durante la duración de la medida. Este no es el caso más frecuente en la región y, en especial, en los últimos años la abundancia de estaciones automáticas en ubicaciones remotas sin mantenimiento periódico y que incluyen medidas de irradiancia solar obligan a prestar especial atención a cómo se realizaron las medidas. Hoy tenemos más información accesible, pero posiblemente de menor calidad que cuando la medida se realizaba sólo en instituciones especializadas.

Existen diferentes propuestas metodológicas en la literatura desarrolladas para filtrado de datos de radiación solar. Dos de las características más importantes para la decisión de qué metodología utilizar son la cantidad de componentes de radiación solar con las que se cuenta y también la frecuencia de adquisición de los datos.

La mayoría de los filtros establecidos en la literatura utilizan todas las componentes de radiación solar (DNI, DHI y GHI). Cuando se cuenta con las tres componentes de radiación solar, un control de consistencia puede ser llevado a cabo teniendo en cuenta la relación entre las componentes de radiación solar y un valor de aceptación a la diferencia entre la GHI medida directamente contra la estimada utilizando las componentes DNI y DHI [Long y Shi, 2006; Perez-Astudillo et al., 2018]. Debido al costo y dificultad asociadas a la adquisición y mantenimiento de un seguidor solar de precisión, existen sitios en los que solo se cuenta con mediciones de GHI y, en el mejor de los casos, también de DHI utilizando una banda de sombreado. En este tipo de casos se debe utilizar alguna otra metodología que permita hacer un control de calidad ya que los controles de calidad establecidos por los anteriores autores no son suficientes. Recientemente se ha desarrollado una metodología de calidad que considera únicamente los valores minutales de GHI y DHI [Nollas et al., 2023]. Por otro lado, muchas estaciones cuentan únicamente con registro de GHI con diferentes frecuencias de adquisición: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min, 30-min y hasta 60-min. Debe tenerse en cuenta que, de acuerdo a la frecuencia de adquisición de los datos y la ubicación de la estación, se pueden presentar diferentes situaciones en los datos por efectos transitorios de nubosidad u otros efectos meteorológicos [Gueymard, 2017]. Nollas et al. (2022) presentaron una metodología preliminar basada en filtros aplicados sobre mediciones de GHI obtenidas con radiómetros instalados junto a estaciones meteorológicas automáticas. Esta metodología consideró algunos de los eventos que pueden presentarse en función de la ubicación de la estación y de la frecuencia de muestreo.

El control de calidad de una serie de medidas de irradiancia solar busca asegurar la consistencia de la medición, y la consistencia interna entre sus componentes y con otras series de medida cercanas. Este proceso es un paso indispensable, antes de confiar en los registros para extraer conclusiones significativas. Debe prestarse especial atención a los posibles errores sistemáticos, ya que éstos persisten al integrar los datos a totales horarios o diarios, por ejemplo.

Antes de proceder a analizar la serie de datos, es necesario analizar los metadatos (ver Sección 2) para formarse una idea de cuáles fueron las condiciones de medida de la serie.



Algunas preguntas previas a responder:

- ¿Cuál es la frecuencia de los registros (1-min, 1-hora, totales diarios, etc.) y en qué medidas instantáneas se basan (promedio de 3 muestras, de 10 muestras, su frecuencia de muestreo, etc.)?
- ¿Cuál es la etiqueta temporal de los datos y en qué sistema se expresa? (UTC, UTC-3, etc.). ¿Están afectadas las etiquetas por cambios de horario de verano? ¿Las etiquetas temporales se asocian al inicio, al punto medio o al final del intervalo (especialmente relevante para datos con frecuencia horaria)?
- La etiqueta temporal, ¿es continua o presenta discontinuidades a lo largo de la serie? ¿Cómo se identifican los datos faltantes? ¿Hay una única forma o coexisten varias?
- ¿Cuáles son los instrumentos utilizados en el registro de los datos (piranómetros, pirhelíometros, segidores solares, dispositivos de sombreadimiento, adquisidores, etc.) y cuál es la fecha de su última calibración trazable? ¿Cuál es la incertidumbre típica estimada de una medida instantánea realizada con estos instrumentos?
- ¿Cuáles son las condiciones climáticas en el sitio de medición? ¿Hay nieve, aguanieve, heladas o rocío? ¿Cuáles son los extremos de temperatura? ¿Llueve frecuentemente o esporádicamente? ¿Hay polvo en el aire?
- ¿Cuáles son los protocolos de mantenimiento periódico de la estación de medida? ¿Hay mantenimiento diario, semanal, mensual o no hay mantenimiento salvo como respuesta a fallas? Este es un factor especialmente importante con los equipos de cúpula (que requiere limpieza frecuente), pero hace también al nivel horizontal de los instrumentos sobre un plano horizontal, por ejemplo.

En suma, la calidad de las series de datos es el resultado de las condiciones en que se midieron, los instrumentos utilizados, su calibración periódica con trazabilidad a un estándar y - sobre todo- el mantenimiento periódico que recibieron durante el período.

En base a la información anterior, un operador con experiencia puede formarse una idea cabal de la incertidumbre real típica que pueden tener las medidas y, además, puede asignar distintas incertidumbres en condiciones diferentes. Por ejemplo, una estación con instrumentos de cúpula y con mantenimiento no regular, no tendrá registros confiables de irradiancia en las horas siguientes a una lluvia y los posibles eventos de desalineación de un seguidor solar pueden durar varios días o más.

Finalmente, debe tenerse en cuenta el objetivo para el cual se desea depurar los datos. Si se desea un conjunto de datos típico, para evaluar el desempeño de modelos por ejemplo, es posible filtrar los registros con Sol bajo (altura solar menor a un umbral) como medidas de mayor incertidumbre y filtrar también registros que muestran situaciones atípicas de corta duración, como por ejemplo, sobre-irradiancia si fuese el caso. En cambio, si el objetivo es contar con totales diarios confiables, el interés estará en que no haya errores sistemáticos en las medidas y en minimizar el número de datos faltantes para la integración diaria.

El procedimiento de control de calidad puede dividirse en 4 etapas: inspección preliminar, filtrado básico, control de consistencia entre componentes, y filtrado más detallado, de las cuales no



todas son necesarias en todas las aplicaciones. Por ejemplo, la consistencia entre componentes en relación a eventos de desalineación del seguidor solar puede no considerarse en estudios que utilicen sólo la GHI. Por otro lado, el filtrado detallado puede ser ad-hoc para un objetivo específico, del cual en este documento se presenta un ejemplo en los anexos.

4.1. Inspección preliminar (chequeos básicos o globales)

La inspección preliminar apunta a detectar fallos o eventos importantes en la serie de medidas, teniendo en cuenta los metadatos. En particular:

- Distribución de datos faltantes.
- Posibles sombras sobre los equipos.
- Desfases en la etiqueta temporal.
- Desalineaciones evidentes.

Varios diagramas funcionan como herramientas auxiliares que pueden ayudar a detectar estos problemas en series de datos de irradiancia solar, y su filtrado manual asistido.

a) Visualización de las medidas vs tiempo.

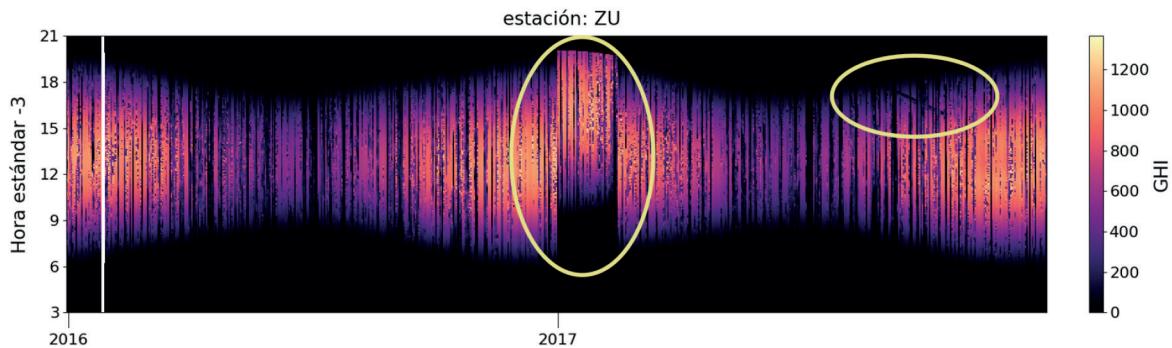
Este tipo de gráficos son simples de implementar y resultan útiles para identificar faltantes, posibles errores sistemáticos (degradación de instrumentos, suciedad, constantes mal aplicadas entre otras) que pueden resultar en un déficit sostenido de la irradiancia medida. Se pueden graficar las medidas en sí (GHI, DHI, y DNI) o sus variantes adimensionadas (k_t , k_d y π_b , respectivamente, siendo éstas la normalización de las anteriores respecto a su correspondiente irradiancia en el tope de la atmósfera, ya sea en plano horizontal como en incidencia normal). En especial, análisis de valores máximos, promedios móviles de valores máximos, o valores diarios pueden ser útiles para detectar degradación paulatina y sistemática de la medida. Es posible detectar huecos en la etiqueta temporal restando sucesivamente los valores consecutivos de la etiqueta, que en caso de estar completa todos los registros deben tener una diferencia de 1 minuto.

b) Diagrama hora vs fecha coloreado por GHI.

Este diagrama, mostrado en la Figura 2 a modo de ejemplo, es especialmente útil para identificar períodos de datos faltantes, desfases temporales o sombreados. Para mayor claridad, es posible complementarlo con una envolvente asociada a la hora de salida y puesta de Sol para cada fecha.



Figura 2: Diagrama de hora (UTC-3) vs fecha para los años 2017 y 2018 en la estación ZU (INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay) administrada por el LES. El color se asocia a GHI. Se marcan episodios de: desfase temporal (de 3 horas), sombreado y datos faltantes (línea blanca vertical). Los datos son de frecuencia minutal y la escala de GHI está en W/m². Gráfico: A. Laguarda.



c) Diagrama solar (altura solar vs azimut) coloreado por GHI o kt.

Este tipo de diagrama es especialmente útil para identificar sombras persistentes. Si se dispone de algunos años de datos, el mismo puede colorearse con el máximo GHI o de kt en el período para cada punto de altura y azimut solar. De este modo, se reduce el efecto de la nubosidad y las zonas que quedan con baja radiación persistente están probablemente afectadas por sombras. La Figura 3 muestra un ejemplo de este tipo de diagrama (utilizando kt codificado en color) en donde se observan sombreadamientos a baja altura solar, alguno de ellos superando los 5°. Este diagrama se puede realizar para cada año de datos, con objetivo de encontrar sombreadamientos que puedan haber afectado la medida en un año dado solamente, ya en este caso, una sombra ocasional aparecería "enmascarada" por los años sin sombra.

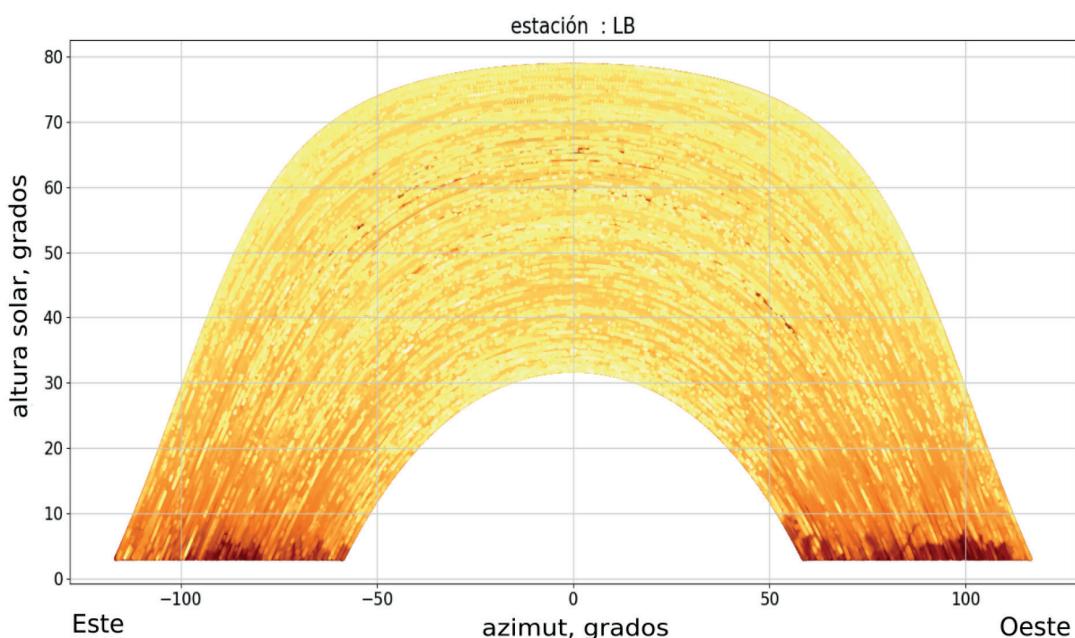


Figura 3: Diagrama solar para siete años de datos con frecuencia minutal en la estación LB (INIA, Las Brujas, Canelones, Uruguay) administrada por el LES. El color está asociado al máximo índice de claridad kt para cada acimut y altura solar en el período considerado (color más claro indica mayor índice). Se aprecian algunas sombras en el horizonte por debajo de 10° . Gráfico: A. Laguarda (LES).

4.2. Filtros de calidad básicos

Un conjunto de pruebas simple y muy usado para un control de calidad básico está basado en los filtros recomendados por la BSRN. Tres de estas pruebas proponen límites para los valores individuales (GHI, DHI, DNI) y otras dos analizan la consistencia de los tres registros (relación de clausura entre las magnitudes) y entre dos de ellos (fracción difusa).

a) Límites superior e inferior en GHI, DHI, DNI

El protocolo BSRN establece tres conjuntos de límites progresivamente más estrictos sobre las variables GHI, DHI y DNI. Dos de ellos a nivel global [Long y Dutton, 2002; Long y Shi, 2006] y el tercero, con parámetros a definir localmente.

La parametrización BSRN para el límite superior aplicable a la variable V (pudiendo ser GHI, DHI, DNI), depende de $\mu_0 = \cos(z)$, siendo z el ángulo cenital solar,

$$V_{max} = S_c \times f \times \mu_0^a + c \quad (1)$$

donde $S_c = 1361 \text{ W/m}^2 \times Fn$ es el valor convencional de la irradiancia media incidente a tope de la atmósfera (antes denominada constante solar) multiplicado por el factor de corrección orbital (Fn) debido a la excentricidad de la órbita terrestre, y f , a y c son parámetros (este último en W/m^2). Este límite superior se complementa con un límite inferior V_{min} para cada variable y el test se supera si se cumple la condición:

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (2)$$

La expresión de la Ec. (1) puede utilizarse para datos con cadencia horaria o sub horaria, debido a que el coseno de z en el punto medio del intervalo es muy similar a su promedio en todo el intervalo. Llamaremos a estas pruebas sobre variables individuales F0 ($V = \text{GHI}$), F1 ($V = \text{DHI}$), F2 ($V = \text{DNI}$), teniendo en cuenta que es posible considerar los siguientes tres casos progresivamente restrictivos para cada prueba.

Límites físicamente posibles (PP)

Este límite se aplica globalmente y apunta a detectar medidas fuera de los límites considerados físicamente posibles. Los parámetros a usar en la Ec. (1) son los indicados en la Tabla 3.



Tabla 3: Parámetros de la Ec. (1) para límites BSRN físicamente posibles.

Test	Variable	f	a	c (W/m ²)	Vmin (W/m ²)
F1	GHI	1.5	1.2	100	-4
F2	DHI	0.95	1.2	50	-4
F3	DNI	1	0	0	-4

Los límites inferiores negativos pueden llamar la atención, pero debe recordarse que durante la noche es esperable observar lecturas negativas pequeñas en un piranómetro de termopila² debido al enfriamiento radiante de su sensor hacia el cielo (error de offset).

Límites extremadamente raros (ER)

Otro conjunto de límites, algo más estrictos, aplicable globalmente corresponde a usar los parámetros indicados en la Tabla 4 en la Ec. (1).

Tabla 4: Parámetros de la Ec. (1) para límites BSRN extremadamente raros.

Test	Variable	f	a	c (W/m ²)	Vmin (W/m ²)
F1	GHI	1.2	1.2	50	-2
F2	DHI	0.75	1.2	30	-2
F3	DNI	0.95	0.2	10	-2

Límites locales (LP)

Finalmente, por inspección del conjunto de datos en un diagrama usando $\cos(z)$ como variable independiente, es posible definir parámetros locales algo más estrictos que los límites globales descritos en las Tablas 3 y 4. Estos límites son aplicables a los datos de la estación particular considerada y otras con condiciones climáticas similares.

A modo de ejemplo, la Tabla 5 muestra los valores de los parámetros de la Ec. (1) usados en la estación LE (Salto, Uruguay) administrada por el LES y la Figura 4 muestra el resultado del filtrado con estos parámetros y los dos conjuntos anteriores, recomendados por la BSRN.

Tabla 5: Parámetros de la Ec. (1) para límites BSRN locales en la estación LE (Salto, Uruguay).

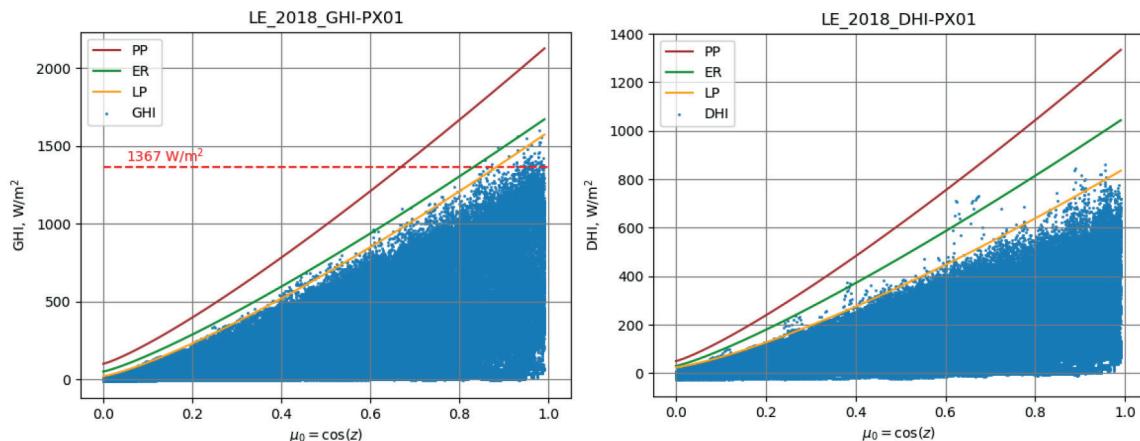
Test	Variable	f	a	c (W/m ²)	Vmin (W/m ²)
F1	GHI	1.15	1.25	20	-2
F2	DHI	0.55	1.1	15	-2

Como en la Figura 4, se muestran solo las variables GHI y DHI.

2. Excepto los antiguos instrumentos de termopila tipo “Black and White”, para los cuales el error de offset es despreciable



Figura 4: Ejemplo de diagramas para GHI (izquierda) y DHI (derecha) con límites superiores dados por la Ec. (1) con coeficientes de la Tablas 1 (rojo), 2 (verde) y 3 locales (amarillo). Se muestra un año de datos (2018) con cadencia minutal. Las leyendas corresponden a los límites Físicamente Posibles (PP), Extremadamente Raros (ER) y Patrón local (LP). Gráficos: G. Abal.



b) Consistencia entre variables

BSRN recomienda dos filtros para asegurar la consistencia entre las variables medidas, que satisfacen la relación

$$GHI = DNI \times \cos(\zeta) + DHI \quad (3)$$

Estos filtros solo se recomiendan para muestras con $GHI > 50 \text{ W/m}^2$. En el primero, se evalúa la relación:

$$r = \frac{GHI}{GHI_c} \quad (4)$$

donde GHI_c es calculada de DHI y DNI utilizando la Ec. (3) y GHI es medida. Idealmente,

se cumple $r = 1$, pero se permite una tolerancia δ_1 que depende de la altura solar (α_s)³

$$1 - \delta_1 \leq r = \frac{GHI}{GHI_c} \leq 1 + \delta_1 \quad (5)$$

Los valores recomendados de BSRN para la tolerancia son $\delta_1 = 0.08$ si $\alpha_s > 15^\circ$ y $\delta_1 = 0.15$ en otro caso (Sol bajo). Esta prueba se muestra en la Figura 5 con dos conjuntos de datos, uno de ellos corregido por error de offset (emisión térmica del instrumento a la atmósfera)⁴.

3. Representa una condición mínima sobre $\cos(z)$, recordando que el $\cos(z) = \sin(\alpha_s)$, donde α_s es la altura solar.

4. La corrección del error de offset es específica para cada instrumento de termopila (piranómetro) y requiere datos simultáneos del flujo infrarrojo entre el instrumento y la atmósfera (medido por un pirgeómetro). Este tipo de corrección excede los límites de este trabajo.



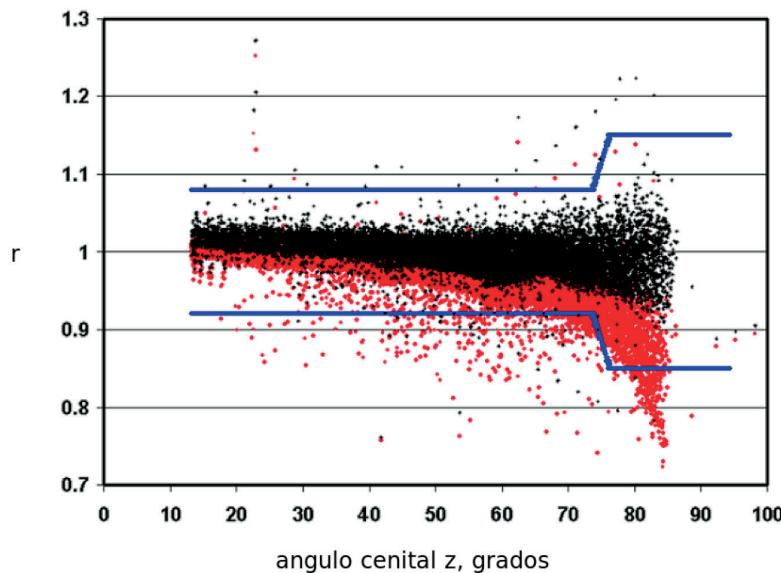


Figura 5: Cociente $r = \text{GHI}/\text{GHIC}$ en función del ángulo cenital z (grados). Se muestran en azul las tolerancias BSRN de 8 y 15 %. Los colores negro y rojo indican, respectivamente, las muestras corregidas y sin corregir por pérdidas en el infrarrojo. Figura de (Long y Shi, 2006).

En el segundo control, se chequea que la fracción difusa cumpla:

$$f_d = \frac{\text{DHI}}{\text{GHI}} < 1 + \delta_2 \quad (6)$$

ya que 1 es el máximo teórico. Se usa una tolerancia δ_2 por el error esperable en las medidas. BSRN sugiere para esta tolerancia los valores $\delta_2 = 0.05$ si $\alpha s > 15^\circ$ y 0.10 en otro caso (Sol bajo). La Figura 6 muestra un ejemplo de esta prueba en un diagrama f_d vs k_t (índice de claridad) usando menores tolerancias (0.03 y 0.07 respectivamente).

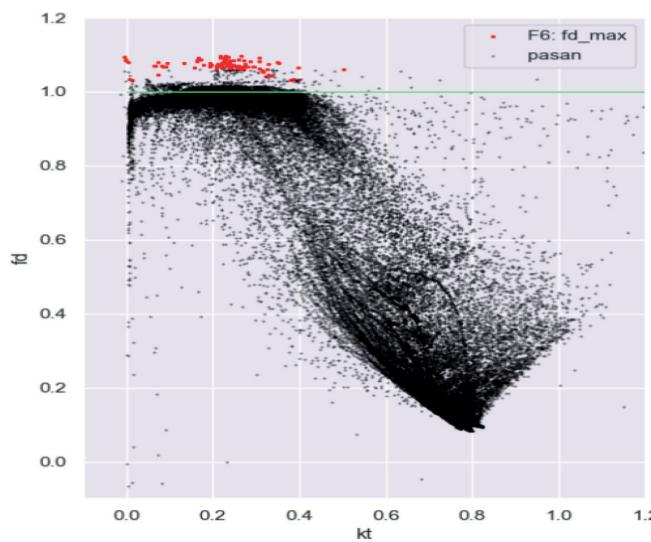


Figura 6. Diagrama de fracción difusa vs índice de claridad mostrando el efecto a nivel minutal del filtrado por la ec.(6) con tolerancias de 3 y 7 % para $\alpha_s < 15^\circ$ (Sol bajo). Los puntos grises son muestras originales, sin filtrado. Los puntos rojos son descartados por el filtro y los puntos negros pasan el filtro. La línea verde simplemente indica el nivel $fd = 1$. Gráfico: G. Abal.

4.3 Registro de los procedimientos de control de calidad

Los procedimientos anteriores deben quedar registrados para que el resultado sea útil al conjunto de los usuarios. En particular, los filtrados no deben usarse para eliminar datos de la serie, ya que lo que se elimina para un objetivo puede ser necesario para otro, y esto solo puede quedar a criterio de cada usuario. Lo recomendable en estos casos es generar un archivo complementario en el cual se guarda, para cada etiqueta temporal, el resultado de aplicar cada filtro y un archivo de metadatos describiendo los detalles del filtrado realizado. De este modo, cada usuario puede elegir con qué conjunto de datos trabajará en función de sus objetivos. Estos archivos se pueden disponibilizar junto a los archivos de datos y a un documento que detalle los filtros aplicados.



➤ ANEXO A - EJEMPLOS DE CONTROL DE CALIDAD MÁS DETALLADO

Posibles filtros adicionales

Para determinados fines es útil no considerar las muestras correspondientes a altura solar baja, ya que para estas muestras el error relativo en la medida es mayor (error de respuesta direccional de los instrumentos, ver Tabla 1, conocido como “error coseno”). Limitar por un valor de altura solar mínima es lo mismo que limitar por un valor mínimo del coseno del ángulo cenital, $\cos(z)$. Por ejemplo, alturas solares mínimas de 15° o 7° corresponden a valores mínimos de $\cos(z)$ de 0,2588 o 0,1218, respectivamente.

Las muestras asociadas a condiciones muy nubladas también pueden estar afectadas por errores de offset importantes en términos relativos (del orden del 20% de la medida, dado que se trata de un valor medido pequeño). Algunos filtros, por ejemplo, el filtro de clausura de la BSRN, no se aplican a muestras por debajo de 50 W/m² de GHI, dado que por errores relativos importantes de los instrumentos en este tipo de condiciones la aplicación del filtro podría resultar en una eliminación excesiva de muestras obtenidas en condiciones de cielo nublado, lo que no es adecuado para varias aplicaciones.

El registro de mediciones de irradiancia difusa normalmente requiere el uso de elementos móviles, ya sea una banda de sombra que debe ser ajustada periódicamente o una esfera de sombreadamiento montada en un seguidor solar de precisión. Cuando hay problemas con la alineación, el sensor de difusa queda total o parcialmente expuesto a la irradiancia directa y su medida se aproxima a la de GHI. Esta condición es indistinguible del efecto de una nube que bloquea la irradiancia directa y ninguna de las pruebas discutidas hasta aquí la detecta específicamente. Notar que la relación de clausura no necesariamente detecta este evento como una falta de consistencia entre mediciones.

En un diagrama de fracción difusa ($fd = DHI / GHI$) vs índice de claridad (kt), como el que se muestra en la Figura 7, estos eventos aparecen en el cuadrante superior derecho, fuera de la nube de puntos típica (alto fd y alto kt) y son evidentes para un observador humano. Puede limitarse la región de este diagrama poniendo límites geométricos sobre fd y kt en esa región [Abal et al., 2017]. Otra alternativa similar para detectar automáticamente eventos de desalineación es utilizar un índice de cielo claro en vez de kt . Si se cuenta con un modelo confiable⁵ para GHI_{lcs} (cielo claro) para la ubicación de interés, el índice de cielo claro se define como $kc = GHI / GHI_{lcs}$. En ese caso, una condición usada para detectar desalineaciones se propone en Perez-Astudillo et al. (2018) es

$$kc < 0.85 \text{ y } fd < 0.85 \quad (7)$$

La Figura 7 muestra un ejemplo de la aplicación de esta condición a un conjunto de datos minutales, indicando en rojo los puntos que no la cumplen. Se utilizó en este caso el modelo de cielo claro de

5. Los modelos de cielo claro confiables reproducen GHI de cielo despejado en la región con incertidumbre del orden de 3-5 % [Laguarda y Abal, 2017]

Inechien y Perez (2002) implementado en la biblioteca Pvlib⁶ con un ciclo medio de turbidez Linke ajustado localmente a la medida e interpolado al minuto (Laguarda y Abal, 2016). Se observa que se filtran los datos en el cuadrante indicado, además de otros, que posiblemente corresponden a muestras afectadas por la desalineación pero que quedan dentro de la nube típica de puntos. Se debe notar que la definición de cuadrantes, tanto en el espacio ($fd - kt$) como ($fd - kc$) es algo artificial, que puede no filtrar la totalidad de las muestras afectadas y además puede afectar muestras legítimas. No existe a la fecha un procedimiento infalible de detección de desalineaciones, siendo la propuesta de Perez-Astudillo et al. una de las más actuales. Los eventos de desalineación, en la mayoría de los casos, son fáciles de detectar al ojo humano a partir de la serie temporal de las tres mediciones de radiación solar (GHI, DHI, DNI). Una alternativa para la detección es, por tanto, la inspección visual de un usuario experto, lo que conlleva una dedicación importante de tiempo por el operario o el usuario de la serie. No obstante, si el procedimiento está acompañado del mantenimiento de bitácoras detalladas, el proceso se realiza una única vez para cada serie.

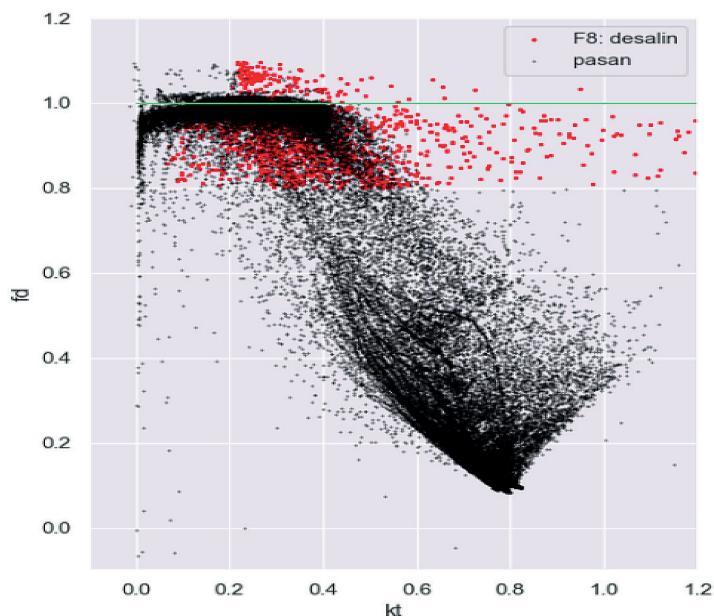


Figura 7. Diagrama de fracción difusa vs índice de claridad mostrando el efecto del filtrado por desalineación, Ec. (7). Mismo código de colores que en la Fig. 6. Gráfico: G. Abal.

Filtrado SERI-QC

Es posible detectar algunos de problemas adicionales analizando la relación entre los datos en el espacio ($fd - kt$) o ($tb - kt$), siendo tb la transmitancia directa ($tb = DNI / S_0$, con S_0 la irradiancia media incidente en el tope de la atmósfera, es decir, la irradiancia solar total, TSI, corregida por el factor orbital, F_n). Una estrategia, desarrollada en NREL bajo el nombre SERI-QC, consiste en utilizar curvas doble exponenciales o sigmoides, como envolventes para la nube de datos en estos espacios

6. <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/index.html>



adimensionados [NREL, 1993]. Se utilizan una serie de parámetros ajustables y el análisis se realiza en varias categorías de masa de aire [Abal et al., 2020, Sec. 3.1.1] y separando los datos por estación del año, ya que la composición típica de la atmósfera presenta comportamiento estacional.

Otro enfoque equivalente es generar una envolvente a partir de la propia nube de datos que pasaron los filtros anteriores [Younes et al., 2005]. Esto tiene la ventaja de permitir un procesamiento automático, al no utilizar parámetros que deben ser inferidos por el usuario.

Consideraciones finales sobre el filtrado de calidad

Se han presentado un conjunto de condiciones a satisfacer por los datos, pero esto no garantiza que los datos resultantes estén libres de errores o problemas no detectados. Para ampliar el repertorio de análisis y filtrado de datos, se puede recurrir a técnicas adicionales de filtrado fino. No describiremos este tipo de filtrado fino en detalle, ya que no es necesario en la mayoría de las aplicaciones y excede los objetivos de este documento. Es importante hacer notar en este punto que un filtrado excesivo de una serie temporal es inadecuado, e incluso puede ser peor que utilizar una serie de datos con algunos pocos datos anómalos. El filtrado de datos debe ser realizado por un usuario experto y debe estar en consonancia con la aplicación requerida para los datos. Lo descrito en este documento son una serie de filtros básicos. No obstante, un usuario puede decidir la aplicación de más filtros, pero debe estar advertido que el sobrefiltrado de datos no es una buena práctica.





REFERENCIAS

REFERENCIAS:

- Abal, G., Aicardi-Vila, D., Alonso-Suárez, R., Laguarda, A., 2017. Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay, *Solar Energy* 141, pp. 166-181.
- Abal, G., Alonso-Suárez, R., Laguarda, A., 2020. Radiación Solar - Notas del Curso de Posgrado de Fundamentos del Recurso Solar, versión 4.0, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Gueymard, C.A., 2017. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. *Solar Energy* 153, pp. 755-765.
- Ineichen P., Perez, R., 2002. A New air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient, *Solar Energy* 73, pp. 151-157.
- ISO 9059:1990 "Solar energy - Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer", International Standardization Organization.
- ISO 9060:2018 "Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation", International Standardization Organization.
- ISO 9846:1993 "Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer", International Standardization Organization.
- ISO 9847:2023 "Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer", International Standardization Organization.
- ISO/IEC 17025:2017(es) "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración", International Standardization Organization.
- ISO/TR 9901:2021 "Solar energy - Pyranometers: Recommended practice for use", International Standardization Organization.
- McArthur, L.J.B., 2005. Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual. WCRP / WMO / TD-No. 1274, World Meteorological Organization (WMO).
- Nollas, F., Orte,, F., Lell, J., Diaz, G., Wolfram, E., 2022. Propuesta preliminar de control de calidad de datos de radiación solar global provenientes de estaciones meteorológicas automáticas. Nota Técnica SMN 2022-119.
- Nollas, F.M., Salazar, G.A., Gueymard, C.A., 2023. Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance, *Renewable Energy* 202, pp. 40-55.
- Norma 1192 - Wigos Metadata Standard: https://library.wmo.int/viewer/55626?medianame=1192_en
- NREL, 1993. Users Manual for SERI QC Software: Assessing the Quality of Solar Radiation Data, National Renewable Energy Laboratory, Report NREL/TP-463-5608.
- Laguarda, A., Abal, G., 2016. Índice de Turbidez de Linke a partir de irradiación solar global en el

Uruguay. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20, pp 11.35-11.46.

Laguarda, A., Abal, G., 2017. Clear-sky broadband irradiance: first model assessment in Uruguay, Proceedings of the the ISES Solar World Congress 2017, ISBN 978-39-81465-97-6, pp. 1360-1371.

Long, C.N., Dutton, E.G., 2002. BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. BSRN Technical Report,

<https://bsrn.awi.de/data/quality-checks/>

Long C.N., Shi Y., 2006. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatologically Configurable Limits. Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report, ARM TR-074, 69 pp., www.arm.gov/publications/tech_reports/doe-sc-arm-tr-074.pdf

OMM, 2021. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: Volume I – Measurement of Meteorological Variables, WMO Nro. 8, Ed. 2021.

OMM, 2023. OSCAR/Surface User Manual, WMO Nro. 8, Ed. 2021.

Perez-Astudillo, D., Bachour, D., Martín-Pomares, L., 2018. Improved quality control protocols on solar radiation measurements, Solar Energy 169, pp. 425-433.

Younes, S., Claywell, R., Muneer, T., 2005. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches, Energy 30, pp. 1533-1549.

