

Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Aplicación de la Norma UNE 206011 de AENOR, para la Generación del Año Solar Representativo, en un Emplazamiento en la Región de Antofagasta, Chile.

Autor: Gonzalo A. Luarte Castro
Tutores: Manuel A. Silva Pérez
Sara Moreno Tejera

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

**Aplicación de la Norma UNE 206011 de AENOR,
para la Generación del Año Solar
Representativo, en un Emplazamiento en la
Región de Antofagasta, Chile.**

Autor:

Gonzalo A. Luarte Castro

Tutores:

Manuel A. Silva Pérez
Profesor titular

Sara Moreno Tejera
Profesora ayudante

Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

A mi Padre y a mi familia
A mis Profesores guías

Índice de Contenido

1	Introducción.....	9
2	Objetivos.....	11
3	Evaluación del Recurso Solar.....	12
3.1	Componentes de la Radiación Solar.....	12
3.2	Metodologías para la Generación de Series de Datos Meteorológicos.....	13
3.3	El Año Solar Representativo (ASR).....	14
3.3.1	<i>Variables y Frecuencia Temporal.....</i>	<i>15</i>
3.3.2	<i>Campaña de Medidas.....</i>	<i>16</i>
	<i>Control de Calidad.....</i>	<i>17</i>
	<i>Validación.....</i>	<i>18</i>
3.3.3	<i>Valor Mensual Representativo a Largo Plazo (VMR).....</i>	<i>19</i>
3.3.4	<i>Generación del ASR.....</i>	<i>20</i>
4	La Estación Meteorológica Terrestre: Crucero II.....	21
4.1	Localización.....	23
4.2	Accesibilidad y Seguridad.....	25
4.3	Alimentación y Comunicación.....	25
4.4	Equipos de Medición.....	26
4.5	Variables Medidas en la Estación.....	29
4.6	Operación y Mantenimiento (O&M).....	29
5	Aplicación de la Norma al Emplazamiento.....	30
5.1	Base de Datos de la Campaña de Medidas.....	30
5.2	Control de Calidad (CC) de Datos e Interpretación del Etiquetado.....	31
5.2.1	<i>Adaptación de las Pruebas a las Condiciones del Emplazamiento.....</i>	<i>32</i>
5.3	Aplicación del Control de Calidad a la Campaña de Medidas.....	33
5.3.1	<i>Análisis de los Resultados del Primer CC.....</i>	<i>36</i>
5.3.2	<i>Criterios de Corrección (Reemplazo de Datos no Aptos).....</i>	<i>38</i>
5.4	Procedimiento de Validación.....	40

5.4.1 Validación Diaria.....	40
5.4.2 Validación Mensual.....	43
5.5 Determinación del VMR utilizando varias Fuentes de Información.....	45
5.5.1 Fuentes de Datos Estimados Complementarias.....	45
5.5.2 Tabla Maestra de Fuentes.....	51
5.6 Generación de la Serie Representativa.....	55
5.6.1 Procedimiento Basado en la Campaña de Medidas.....	55
5.6.2 Método de Sustituciones.....	56
5.6.3 Informe de Salida del ASR.....	58
6 Análisis de Resultados.....	59
7 Conclusiones.....	62
8 Referencias.....	64
9 Bibliografía.....	66
10 Anexos.....	67
Anexo A.....	67
Anexo B.....	69
Anexo C.....	71
Anexo D.....	72

Índice de Figuras

Figura 1. Campaña de medidas.....	16
Figura 2. Factores decisivos en la calidad de las mediciones.....	17
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento de control de calidad y validación.....	19
Figura 4. Opciones de metodologías para obtener el VMR.....	20
Figura 5. Mapa satelital de irradiancia global horizontal en 2015. © Vaisala.com.....	22
Figura 6. Mapa con la ubicación de las estaciones, a lo largo de Chile. En rojo las de categoría 1 y en naranja las de 2 [14].....	22
Figura 7. Horas de sol al año en la estación meteorológica Crucero II.....	23
Figura 8. Localización de la estación. © Google.com.....	24
Figura 9. Vista de la estación meteorológica dentro de la subestación eléctrica. © Google.com.....	25
Figura 10. Alimentación y comunicación de la estación. © CENMA.....	26

Figura 11. Configuraciones usuales de radiómetros en estaciones terrestres. Calificadas cualitativamente según sus mediciones de DNI.....	27
Figura 12. Equipos de medición de radiación solar y vista completa de la estación. © CENMA.....	28
Figura 13. Equipos de medición adicionales: dirección, velocidad del viento y temperatura. © CENMA.....	29
Figura 14. Representación de los casos en que el ángulo cenital pasa los 90° antes de los primeros 5 minutos.....	33
Figura 15. Primer CC a los datos de 2013. En un círculo los datos que presentan anomalías.....	34
Figura 16. Primer CC a los datos de 2014.....	35
Figura 17. Primer CC a los datos de 2015.....	35
Figura 18. Primer CC a los datos de 2016.....	36
Figura 19. Variables medidas en 2013/10/03 con un dato anómalo a las 18:05. (IE: irradiancia extraterrestre)	37
Figura 20. Variables medidas en 2015/05/17 con datos anómalos a partir de las 13:45 hasta las 17:25. En un círculo rojo se representan estos datos en el gráfico de DNI de etiquetas a la izquierda.....	37
Figura 21. Variables medidas en 2016/02/24 con un dato anómalo a las 10:45. (IE: irradiancia extraterrestre)	38
Figura 22. Medidas del 28/09/2013 a las 18:35, etiquetadas de acuerdo a la metodología de la BSRN.....	39
Figura 23. Segundo CC a los datos de 2013, posterior a la aplicación de criterios de corrección.....	41
Figura 24. Segundo CC a los datos de 2014, posterior a la aplicación de criterios de corrección.....	41
Figura 25. Segundo CC a los datos de 2015, posterior a la aplicación de criterios de corrección.....	42
Figura 26. Segundo CC a los datos de 2016, posterior a la aplicación de criterios de corrección.....	42
Figura 27. Meses válidos (verde), por validar (amarillos) y no válidos (rojos), para cada base de datos de la campaña de medidas.....	43
Figura 28. Procedimiento para sustituir el día no válido 05/12 de 2016.....	44
Figura 29. Días candidatos de 2013 para sustituir el día no válido 05/12 de 2016.....	44
Figura 30. En fila superior: primer CC, en fila inferior: CC final a los datos de 2016 del Explorador Solar.....	46
Figura 31. A la izquierda se identifican los meses por validar de 2016, a la derecha el resultado de la validación mensual.....	46
Figura 32. GHI estimada por el Explorador Solar versus GHI medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.....	47
Figura 33. Primer CC a los datos originales del período 1991-2010 de Meteonorm.....	48
Figura 34. GHI estimada por Meteonorm (20 años) versus GHI medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.....	49
Figura 35. Irradiación global horizontal estimada por la NASA versus la medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.....	51
Figura 36. Sustitución de días de marzo de 2015 por días de marzo de 2013.....	57
Figura 37. Comparativa entre las principales fuentes de estimación de irradiación global horizontal y el ASR.	

(Los valores para NASA y Explorador Solar, corresponden a la media del período que cubre cada fuente)...	59
Figura 38. Comparativa entre los datos medidos de irradiación global horizontal en Crucero II y su ASR. (Los valores de Crucero_II, corresponden a la media de los años con mediciones).....	60
Figura 39. Comparativa entre las principales fuentes de estimación de irradiación directa normal y el ASR. (Los valores del Explorador Solar, corresponden a la media del período que cubre esa fuente).....	61
Figura 40. Comparativa entre los datos medidos de irradiación directa normal en Crucero II y su ASR. (Los valores de Crucero_II, corresponden a la media de los años con mediciones).....	61
Figura 41. Horas de sol, promedio años 2013, 2014, 2015 y 2016 en Calama. (Instrumento de medición: Heliógrafo Campbell Stokes). Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.....	62
Figura 42. Tercer CC a los datos de 2015, posterior a la validación mensual.....	69
Figura 43. Tercer CC a los datos de 2016, posterior a la validación mensual.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de la estación.....	24
Tabla 2. Radiómetros.....	26
Tabla 3. Equipos instalados.....	28
Tabla 4. Variables incluidas en el ASR, en orden de relevancia.....	29
Tabla 5. Extracto de la base de datos utilizada para crear la campaña de medidas.....	30
Tabla 6. Descripción del etiquetado como resultado del CC.....	32
Tabla 7. Ejemplo de la aplicación de un criterio a un dato no apto.....	39
Tabla 8. Configuración de la fuente: Explorador Solar.....	46
Tabla 9. Comparación entre el Explorador Solar y los datos medidos en Crucero II.....	47
Tabla 10. Configuración de la fuente: Meteonorm.....	48
Tabla 11. Comparación entre Meteonorm y los datos medidos en Crucero II.....	49
Tabla 12. Configuración de la fuente: NASA.....	50
Tabla 13. Comparación entre NASA y los datos medidos en Crucero II.....	50
Tabla 14. Valores mensuales de entrada de la campaña de medidas para determinar el VMR.....	52
Tabla 15. Valores mensuales de entrada por fuentes de estimaciones para determinar el VMR.....	52
Tabla 16. Valores mensuales de entrada por fuentes de estimaciones para determinar el VMR.....	53
Tabla 17. Valores mensuales representativos a largo plazo (VMR) para el emplazamiento Crucero II.....	55
Tabla 18: Meses de la campaña de medidas elegidos, para formar parte del ASR.....	56

Tabla 19. Meses de la campaña de medidas definitivos que componen el ASR.....57

Tabla 20. Valores mensuales ASR.....59

1 Introducción

El interés, cada vez mayor, por el aprovechamiento de la radiación solar ha motivado tanto a los gobiernos, en los sectores ligados al medio ambiente y la energía, como a la comunidad científica, a investigar esta fuente prácticamente inagotable de energía y a desarrollar tecnologías para su uso, cada vez más eficientes. De la mano de la eficiencia viene el interés por determinar las cantidades disponibles del recurso solar en puntos específicos del planeta. Esto ha forzado la evolución de los clásicos TMY hacia metodologías mejor adaptadas a los requerimientos de los grandes proyectos termosolares. Es así, como la Asociación Española de Normalización (AENOR) ha visto esta necesidad y la ha transformado en la Norma UNE 206011, que tiene como objetivo final, estandarizar una metodología para generar un Año Solar Representativo (ASR) en un emplazamiento específico.

El presente documento aplica la Norma UNE 206011, publicada en octubre de 2014, para la generación de un ASR. El ASR es una fuente de información sobre las variables de radiación solar¹ y meteorológicas, que representan el comportamiento a largo plazo del recurso solar en un emplazamiento específico. Esta serie de registros es el punto de partida para evaluaciones económicas, cuyo objetivo sea la instalación de una central termosolar.

Para la aplicación de esta Norma², es necesario contar con una estación meteorológica terrestre, por esto se ha elegido una estación ubicada en el desierto de Atacama en Chile, que tiene los instrumentos adecuados para la medición de las variables solares, y que además dispone de radiación solar abundante durante todo el año.

Este informe abarca desde la adquisición de los datos de la estación meteorológica terrestre y otras fuentes complementarias externas, hasta la generación del ASR, siendo puntos centrales, la aplicación de la Norma y el control de calidad de los datos.

Utilizando la metodología definida en la Norma y los procedimientos para el control de calidad de datos, recomendadas por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [2], se aplican procesos de selección y sustitución a las mediciones de radiación solar, obteniéndose como resultado series de datos con las condiciones necesarias para formar parte de un ASR.

Si bien es cierto, en la Norma no existe un único camino para calcular el ASR, el seguido en este trabajo con la información accesible a la fecha, provee un ASR basado en 4 años de mediciones de una

1 En este informe y al igual que en la Norma, se usa el término radiación solar como referencia genérica a la energía electromagnética proveniente del Sol, y se emplean irradiancia solar [W/m^2] e irradiación solar [kWh/m^2] para las magnitudes físicas tal cual se definen en la Norma UNE-EN ISO 9488 [1].

2 De aquí en adelante, cuando se hable de Norma solamente, sin especificar más, se estará refiriendo a la Norma UNE 206011, sobre la cual se basa este trabajo.

estación meteorológica terrestre y 24 años de estimaciones de datos radiométricos por fuentes complementarias. Se busca por tanto, representar lo mejor posible el recurso solar disponible en el emplazamiento, que es el objetivo principal de la Norma.

2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es aplicar la Norma UNE 206011 de AENOR, a series anuales de datos medidos y estimados de irradiancia solar, provenientes de un emplazamiento ubicado en la región de Antofagasta en Chile, para obtener un Año Solar Representativo (ASR) del lugar, a través, de los procedimientos indicados en la Norma.

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

- Describir la zona geográfica, el lugar del emplazamiento y las características de la estación meteorológica, con el fin de mostrar las condiciones idóneas para la aplicación de la Norma, mediante las variables climáticas registradas por la estación.
- Analizar las series de datos anuales, tanto las generadas por la estación meteorológica, como las que proveen otras bases de datos externas, para determinar si entrarán a formar parte de la “campaña de medidas” y como fuentes de estimación complementarias, respectivamente.
- Aplicar sucesivos controles de calidad a las fuentes de mediciones y estimaciones, utilizando la metodología de la BSRN implementada en una herramienta gráfica. Y mediante procedimientos de selección y sustitución definidos en la Norma, conseguir la validación diaria y mensual de los datos, con el fin de disponer de años completos válidos.
- Determinar los valores mensuales representativos (VMR) del comportamiento a largo plazo del recurso solar en el emplazamiento, usando los datos mensuales de mediciones y estimaciones de irradiación global horizontal validados, para seleccionar los meses de la “campaña de medidas” que formarán el ASR.
- Presentar el informe final previsto por la Norma y un análisis de los resultados del ASR generado para la estación meteorológica terrestre Crucero II.

3 Evaluación del Recurso Solar

La radiación solar es el principal insumo para todas las aplicaciones de energía solar, desde pequeñas instalaciones a grandes plantas solares. Sin embargo, es de particular interés para los grandes proyectos debido a que estos requieren de una importante inversión. Antes de iniciar un proyecto, es necesario contar con datos fiables de la radiación solar en el emplazamiento específico, para conocer su tendencia histórica, la variación diaria u horaria (preferiblemente a mayor resolución³), con el fin de predecir la producción de una planta solar. Sino se cuenta con esa información, no es posible realizar un análisis financiero preciso [3].

Para determinar la radiación incidente sobre la superficie terrestre, se requieren datos de sus componentes principales, esta información se puede obtener principalmente a través de:

- Modelos físicos, empíricos o mixtos.
- Mediciones en el emplazamiento.

De estas fuentes de información para la Norma, las mediciones en el emplazamiento tendrán un peso mayor frente a las estimaciones, en la generación del ASR.

3.1 Componentes de la Radiación Solar

Antes de alcanzar cualquier punto de la superficie de la Tierra, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en la que se ve sometida a un proceso de atenuación dependiente de la longitud del camino recorrido. Este proceso viene determinado por la altura y posición del sol, y principalmente por la composición atmosférica [4]. En su trayectoria a través de la atmósfera la radiación puede ser transmitida, absorbida o dispersada. Las complejas interacciones que ocurren al atravesar la atmósfera derivan en tres componentes necesarios para los sistemas basados en energía solar.

Irradiancia Directa Normal

De particular interés para los sistemas del tipo concentrador, de receptor central, canal parabólico, lineal de Fresnel y disco parabólico, que concentran la radiación para su aprovechamiento. Por irradiancia directa normal se entiende el valor de la magnitud, tal y como se define en la Norma UNE-EN ISO 9488 [1]:

3 Mayor resolución o frecuencia, implica un período de tiempo menor.

"Flujo radiante recibido en una superficie plana procedente de un pequeño ángulo sólido centrado en el disco solar, y el área de dicha superficie, siendo esta superficie perpendicular al eje del ángulo sólido".

La nomenclatura para la irradiancia directa normal, que se utilizará en este informe y que es comúnmente utilizada en la Norma y en la literatura relacionada, es DNI (Direct Normal Irradiance).

Irradiancia Difusa Horizontal

Es la radiación dispersa en el cielo que llega al suelo, también se puede definir como aquella radiación que representa a toda la radiación del cielo excepto a la DNI, su notación abreviada es DHI (Diffuse Horizontal Irradiance).

Irradiancia Global Horizontal

Es la suma geométrica sobre una superficie horizontal del producto de la radiación directa horizontal o de la proyección sobre superficie horizontal de la radiación directa normal [$DNI * \cos(\theta_z)$] y la DHI [Ec.1], y su notación abreviada es GHI (Global Horizontal Irradiance).

$$GHI = DNI * \cos(\theta_z) + DHI \quad (1)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital formado por la línea Tierra-Sol con la vertical en el punto del observador, para una fecha, hora y lugar específico.

Esta ecuación es fundamental y es la base de algunos sistemas de medición de radiación solar, de evaluación de la calidad de los datos y de modelos de estimación de la radiación solar.

3.2 Metodologías para la Generación de Series de Datos Meteorológicos

Por convenio, la comunidad meteorológica ha considerado, desde la Conferencia Internacional Meteorológica de Varsovia en 1933, que un intervalo de 30 años es suficiente para reflejar tendencias climáticas en largos períodos, lo que permite además filtrar las fluctuaciones y anomalías interanuales de períodos más cortos [3].

Basada en largos períodos de tiempo, una metodología muy común y extendida para caracterizar

las condiciones meteorológicas típicas de un lugar, se conoce como Año Meteorológico Típico (TMY: Typical Meteorological Year en USA o Test Reference Year: TRY en Europa). Este año provee un set de datos usualmente de 8760 horas, con valores que estandarizan las condiciones meteorológicas y de radiación solar de una localidad específica, usando datos observados en intervalos de 15 años o más. Un TMY no es una herramienta predictiva que nos permita anticipar las condiciones del próximo año, más bien representa las condiciones climáticas típicas de un largo período de tiempo examinado.

En la literatura se encuentran varios métodos para generar un TMY. A continuación se mencionan tres:

- El danés, por Andersen et al. (1977) y por Lund & Eidorff (1981).
- El de Festa Ratto (1993).
- El de Sandia National Laboratory por Hall et al. (1978).

Estos tres métodos están explicados en detalle en Argiriou et al., 1999; Ecevit et al., 2002; Gazela & Mathioulakis, 2001 [5]. Estos métodos requieren de datos climáticos medidos en largos períodos de tiempo para generar un TMY de un sitio en particular. Por consiguiente, han surgido otros métodos para estimar las variables meteorológicas cuando no se cuenta con mediciones de largo plazo, como los propuestos por Santos et al. [6].

El TMY pasó a ser un Design Reference Year (DRY) cuando se le agregaron nuevas variables como la irradiancia directa medida cada 5 minutos e información de pronósticos. Lund [7] hace una detallada descripción de un DRY usando 10 años de datos como mínimo.

A partir de estos desarrollos, en general, las metodologías no han variado radicalmente. En lo particular las principales diferencias están relacionadas con [8]:

1. Las variables usadas para construir las series finales.
2. El peso asignado a cada variable en el proceso de selección.
3. La aplicación de 1, 2 o más pasos en el proceso de selección.

En años recientes, el uso cada vez más específico de la información provista por los TMY, derivado del incremento de proyectos termosolares, ha llevado a la comunidad científica a buscar adaptaciones de estas metodologías.

3.3 El Año Solar Representativo (ASR)

Los datos necesarios para la generación de los referidos Años Meteorológicos Típicos (TMY) claramente están disponibles en muy pocos sitios y no cuando se requieren en un sitio específico, que es lo que a menudo ocurre. Además, los TMY no se adaptan bien a las necesidades de información específicas y

características especiales de las centrales termosolares, por tanto, es necesario definir una nueva metodología, para cuando no hayan suficientes mediciones disponibles en largos períodos, que permita la homogeneización de los procedimientos utilizados actualmente para este propósito.

El objetivo principal de esta Norma es estandarizar un año, un año que comprende el ciclo solar más importante. Por tanto, surge la necesidad de generar un Año Solar Representativo (ASR) funcional que provenga de una metodología homogénea y específica, que aporte información precisa, ordenada y estandarizada del recurso solar, a los estudios de simulación de centrales termosolares. Que asegure su operatividad en estudios de viabilidad y que permita además, comparar diferentes alternativas de emplazamientos.

De acuerdo a la Norma UNE 206009 "Centrales Termosolares, Terminología" [9], un Año Solar Representativo (ASR) es:

"Para estudios de producción y análisis de viabilidad de una central termosolar, se define el ASR como un conjunto estándar y completo de datos de irradiancia solar directa, pudiendo ir acompañados de otras variables meteorológicas que se consideren de interés, que pretenden establecer una referencia de la evolución radiométrica de un lugar concreto a lo largo del año. Este conjunto de datos debe poseer características probabilistas próximas a aquellas correspondientes a un conjunto histórico de datos que represente la variabilidad de largo plazo."

3.3.1 Variables y Frecuencia Temporal

La variable fundamental e imprescindible para la aplicación de esta Norma, es la **irradiancia directa normal (DNI)**, pero es muy recomendable contar además con mediciones de GHI y DHI. Aunque la variable DNI es imprescindible, esta puede ser obtenida por una medición directa o indirecta. Un dato medido directo, se define en la Norma UNE 206009 "Centrales Termosolares, Terminología" [9] como:

"Valor de una variable determinado mediante un instrumento de medida situado en la superficie del emplazamiento específico. Será considerado dato medido directo cualquier estadístico derivado de valores de la misma variable..."

y un dato medido indirecto, como:

"Valor de una variable determinado mediante la combinación de varios datos medidos directos de otras variables...un ejemplo es la irradiancia directa normal obtenida a través

La frecuencia temporal o el intervalo de tiempo entre mediciones del ASR, debe ser horaria o superior, es decir, mayor resolución o frecuencia, implica un intervalo de tiempo menor. Para el caso de la DNI al menos debe representar la media del intervalo.

Otras variables utilizadas, se obtienen directamente de las medidas de irradiancia, esta es la irradiación, o cantidad total de energía recibida durante un determinado período de tiempo.

3.3.2 Campaña de Medidas

Este apartado es fundamental dentro de la Norma, será esta serie de mediciones la que aportará un mayor peso para la obtención del VMR y a partir de la cual se seleccionarán los meses que formarán el ASR final. Esto se fundamenta en que los modelos del tipo físico, empírico o mixto, no son más precisos que los datos medidos [10]. Por tanto, lo más o menos característico que pueda llegar a ser el ASR de un emplazamiento en particular, depende en gran parte de este punto, en cuanto a la calidad de las variables medidas que se disponga, esto se comentará también en la sección 4.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del procedimiento a seguir para validar la campaña de medidas, cuyo proceso principal es el control de calidad y validación de los datos. El objetivo final es obtener, como mínimo, un año completo de mediciones válidas.

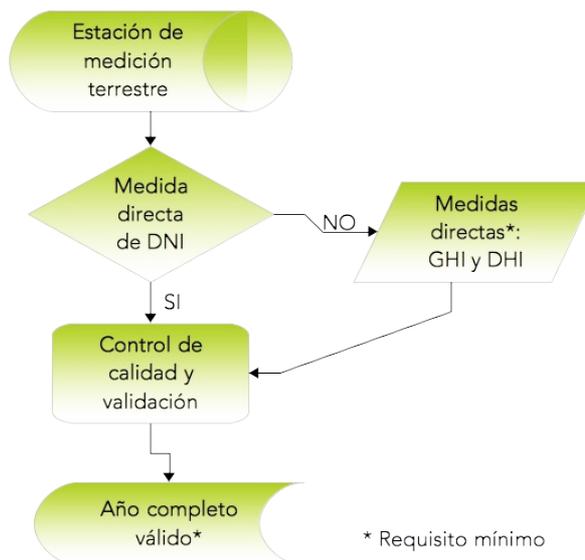


Figura 1. Campaña de medidas.

Control de Calidad

La calidad de los datos se establece generalmente cuando se toma la medición. Poco se puede hacer después para mejorar la calidad original. Por ejemplo, una estación con poco mantenimiento, con óptica sucia o instrumentos desalineados producirá con seguridad datos erróneos, y la magnitud de esos errores es probable que no sea discernible sino hasta días o semanas después. En este contexto, el control de la calidad de los datos es un proceso clave para detectar los datos anómalos y eliminarlos de la campaña de medidas.

Algunos factores a tener en cuenta, que influyen en gran medida en la calidad de los datos, se verán a lo largo de este informe, y se pueden resumir en el esquema siguiente.



Figura 2. Factores decisivos en la calidad de las mediciones.

Cada factor contribuye a obtener mediciones de mejor calidad, lo que facilitará el proceso de control de calidad y validación de los datos.

El control de calidad de los datos es un método mediante el cual se puede juzgar la calidad de los datos sobre la base de criterios para una aplicación particular. Muchos errores específicos de los datos meteorológicos pueden detectarse automáticamente mediante algoritmos de rastreo [3]. Existen metodologías documentadas en numerosas publicaciones, propuestas por organismos e investigadores como la Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [2] o Maxwell, Wilcox, & Rymes (1993) [11].

El control de calidad aplicado en este estudio, se basará en la metodología publicada por la BSRN en el artículo "BSRN Global Network recommended quality check tests, V2.0" (ver Anexo A). Los resultados se presentarán utilizando un nuevo tipo de representación gráfica que facilita la rápida identificación e interpretación de la clase de datos disponibles, desarrollado con el software matemático MATLAB® (Versión R2014b (8.4.0)) [12]. S. Moreno et al. presentan esta herramienta gráfica y varios ejemplos de su aplicación [13].

Validación

Como consecuencia del control de calidad, se pueden o no, detectar datos anómalos. En el caso de identificar datos anómalos, la Norma indica que deben pasar por un proceso de validación, que consiste en establecer una tolerancia de mediciones anómalas para los días. Cuando esta tolerancia es excedida se consideran días no válidos. Para lo cual la Norma establece que:

“Se considerarán válidos aquellos días en que, de existir anomalías en la medida de la irradiancia directa normal (valores que no hayan superado los controles de calidad), éstas anomalías acumuladas no superen el periodo global de una (1) hora.”

Lo anterior implica que para mediciones con frecuencia horaria, más de una medición no apta al día es suficiente para que ese día sea considerado un día no válido. Para el caso de este trabajo con frecuencia de 10 minutal, se permiten seis (6) anomalías por día, de lo contrario pasaría a ser un día no válido.

Lo mismo ocurre para los meses que excedan la tolerancia de días no válidos, esos meses no válidos, no pueden formar parte de la campaña de medidas. Según la Norma:

“Se consideraran meses válidos aquellos meses en que, de existir días no válidos, éstos no superen el número de cuatro (4) días.”

Los días con datos anómalos que estén dentro de la tolerancia, deben corregirse según la Norma, de forma coherente, por ejemplo con una interpolación lineal. Y los meses con días no válidos pero dentro de la tolerancia, seguirán un procedimiento de sustitución.

La forma en que estos procedimientos interactúan para conseguir el objetivo de armar un año de mediciones válidas, se resume en el siguiente diagrama.

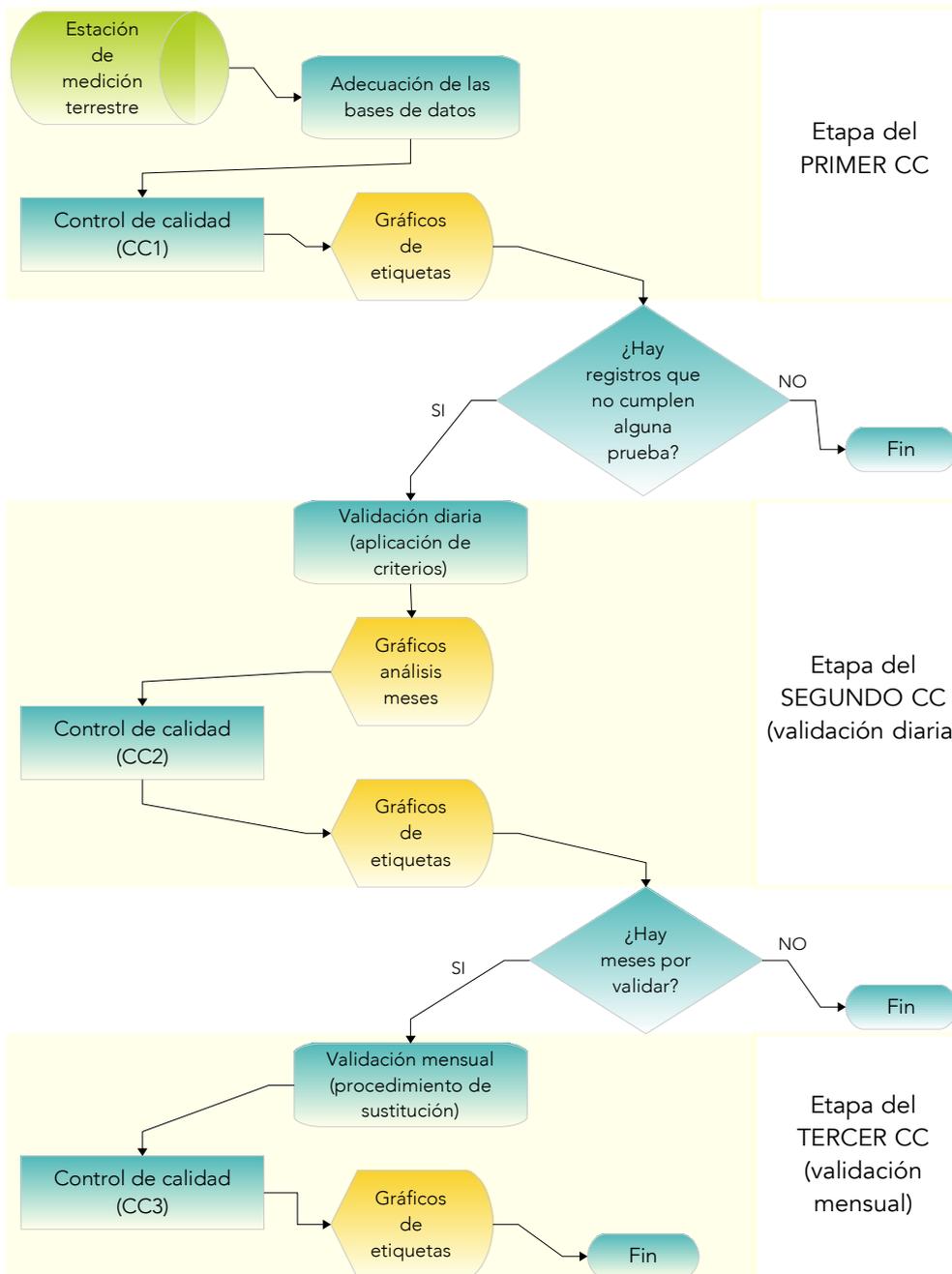


Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento de control de calidad y validación.

3.3.3 Valor Mensual Representativo a Largo Plazo (VMR)

En la Norma se proponen dos metodologías para el cálculo del VMR, la utilizada en este trabajo emplea los datos que actualmente se disponen para el emplazamiento (campaña de medidas), y los derivados de diferentes fuentes complementarias con datos estimados de valores mensuales de GHI provenientes de información satelital. En el esquema (Figura 4) correspondería a la opción 1.

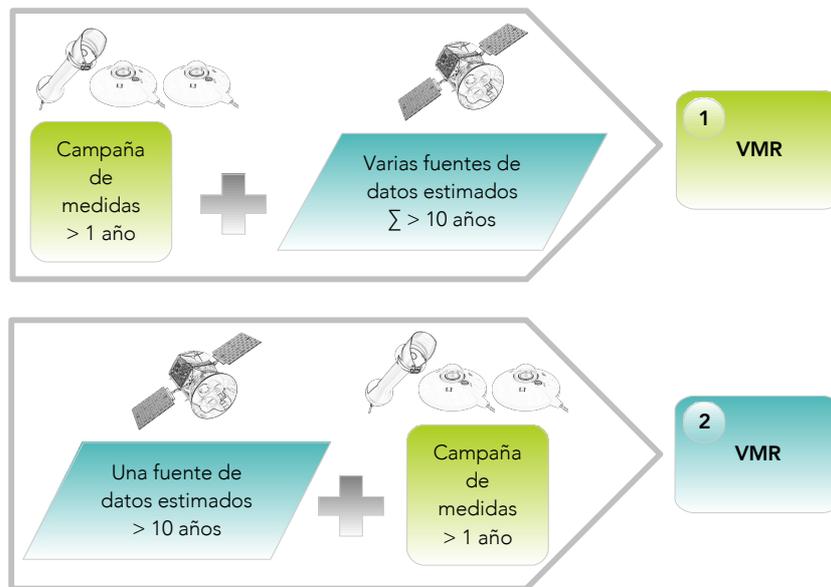


Figura 4. Opciones de metodologías para obtener el VMR.

Esta metodología (opción 1) únicamente será aplicable si se cumple al menos una de las siguientes condiciones:

- El número de fuentes de datos sea igual o superior a cuatro, es decir, el total de fuentes externas o complementarias, más la campaña de medidas. Y donde las fuentes externas en su conjunto, deben abordar un período mínimo de 10 años consecutivos.
- La suma de los pesos de cada fuente (P_i) [Ec. 3] suministre un valor igual o superior a 1.

La determinación del VMR, utilizando varias fuentes de información, consiste en valorar cuantitativamente las distintas fuentes de datos medidos y estimados, asignándoles pesos mediante factores como período de tiempo, distancia al emplazamiento, tipo de dato (directo, indirecto o estimado) y tipo de fuente (contrastada o no). Esto determinará su mayor o menor representación de las características solares del emplazamiento. En consecuencia, la sumatoria de todos los valores mensuales de irradiación global horizontal ponderados por el peso de cada fuente, estimarán los VMR para cada mes en el largo plazo.

Igualmente que los registros de la campaña de medidas, las fuentes complementarias deben pasar en lo posible por procesos de control de calidad y validación como los descritos anteriormente.

3.3.4 Generación del ASR

La generación de la serie representativa está basada en la campaña de medidas, aunque también podría realizarse a partir de estimaciones de DNI, si se hubiese desarrollado la opción 2, de las

metodologías de VMR (Figura 4).

Éste procedimiento consiste en seleccionar de los años válidos de la campaña de medidas, los 12 meses cuya diferencia absoluta con el VMR sea la menor, y además, no sea superior a la doceava parte del 2% del valor anual representativo (VAR) [Ec. 2].

$$|VMR_j - VM_{jk}| < \frac{2\% * VAR}{12} \quad (2)$$

$$\text{donde } VAR = \sum VMR_j \quad j = 1, \dots, 12$$

El lado izquierdo de la expresión significa que el VMR se compara con el VM de cada mes j y cada año k de la campaña de medidas.

En caso de no haber valores mensuales (VM_{jk}) que cumplan con la ecuación 2, se debe aplicar un método de sustituciones diarias con el objeto de alcanzar la mayor cercanía posible al VMR_j calculado al inicio.

Originalmente propuesto por Hoyer-Klick [8] se pueden reemplazar días completos a una distancia máxima de +/- 5 días para prevenir que los ángulos solares y la longitud del día varíen demasiado en comparación con el día en cuestión. Adicionalmente se establece que no debe aparecer un mismo día de la serie original más de 4 veces y que en la serie generada no debe haber más de un 50% de datos sustituidos por mes.

Alternativamente, en la Norma se recomienda sustituir un día por otro día con idéntica fecha pero de otro año, para no introducir errores dada la diferencia en la trayectoria solar. Para esto es recomendable tener al menos un par de años completos y válidos en la campaña de medidas, de donde elegir. En cualquier caso los valores mensuales (VM_{jk}) tienen que cumplir con la ecuación 2.

4 La Estación Meteorológica Terrestre: Crucero II

La selección del emplazamiento estudia numerosos factores, pero el prioritario es tener un buen recurso solar. Identificar estas zonas es simple a primera vista, sólo con observar un mapa solar satelital de la tierra (Figura 5) se distinguen.

La información satelital es muy útil para mapear grandes regiones, pero a menor escala para un emplazamiento específico de pocos kilómetros cuadrados, debe analizarse mediante una estación meteorológica de medición terrestre que considere los efectos locales.

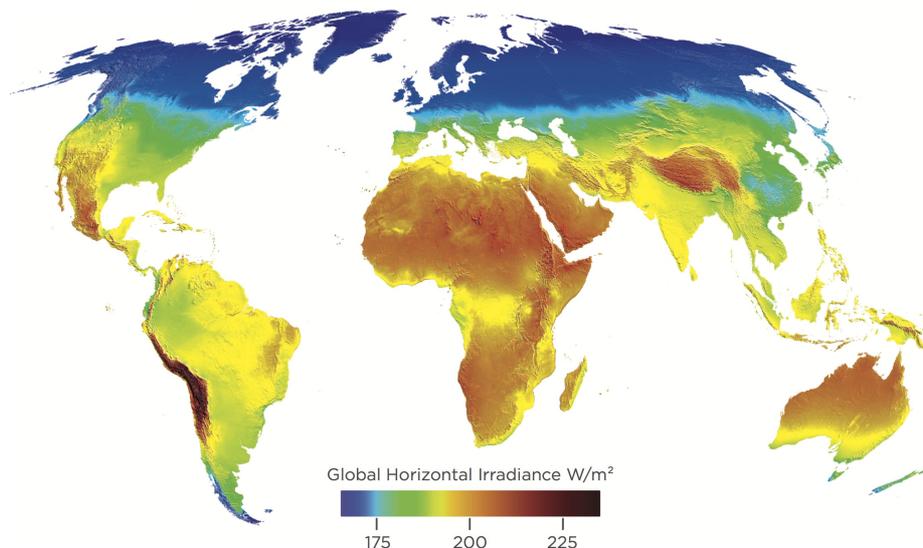


Figura 5. Mapa satelital de irradiancia global horizontal en 2015. © Vaisala.com

A pesar de la importancia de las mediciones de radiación solar para la evaluación de los recursos, es lamentable que la distribución de estaciones de medición de alta calidad en todo el mundo sea desordenada y desigual. Esto se debe en parte al coste de adquisición, instalación, operaciones y mantenimiento (O&M), recopilación, registro y control de calidad de los datos, además de las siempre inestables políticas sobre cambio climático [10].

Chile cuenta a lo largo de su territorio, con aproximadamente 131 estaciones que miden irradiancia global horizontal. Los datos provienen de las redes de medición CEAZA-MET, AGROMET-INIA, DMC, Ministerio de Energía-GIZ y estaciones privadas [14]. De acuerdo a una clasificación realizada por el departamento de geofísica de la Universidad de Chile, las estaciones se han separado en categoría 1 (67 estaciones) y 2 (64 estaciones) (Figura 6). Las estaciones de categoría 1 son las de mejor calidad, poseen tendencias pequeñas o nulas y se han eliminado la mayor cantidad de datos extraños. Estas estaciones pueden ser usadas para validar la magnitud de la radiación en distintas escalas de tiempo. Las estaciones de categoría 2 poseen grandes tendencias en los datos y mucha variabilidad entre distintos años o meses, es decir, no se puede determinar si la magnitud de la radiación es confiable. La estación meteorológica Crucero II tiene categoría 1.

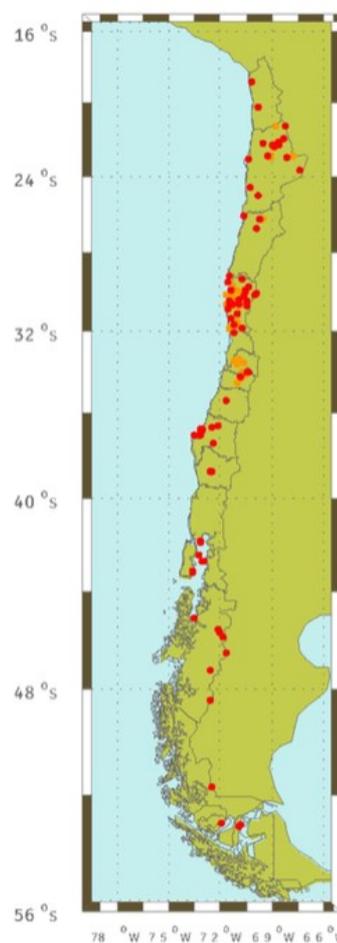


Figura 6. Mapa con la ubicación de las estaciones, a lo largo de Chile. En rojo las de categoría 1 y en naranja las de 2 [14].

4.1 Localización

La estación se encuentra ubicada en terrenos de la subestación eléctrica Crucero, propiedad de la empresa e-CL, en la provincia de Tocopilla, comuna de María Elena, II Región de Antofagasta, Chile.

Instalada por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), por encargo de Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, bajo un convenio de cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania, en el marco del proyecto "Estrategia de Expansión de las Energías Renovables en los Sistemas Eléctricos Interconectados", implementado por el Ministerio de Energía (MINENERGÍA), quedó completamente operativa el 18 de agosto de 2012 [15].

La estación está a 69 km de la costa del pacífico, en la franja intermedia de la región de Antofagasta. La zona climática en la que está inmersa es de una extrema aridez con precipitaciones muy escasas, poca vegetación, gran sequedad atmosférica, con una humedad relativa inferior al 30% (media anual) y una fuerte oscilación térmica entre el día y la noche ($\sim \Delta 20^\circ$). Esta zona es conocida como el Desierto de Atacama⁴. Asociado al clima desértico que predomina en la zona, se observa un alto número de días despejados durante todo el año, con ~ 3800 horas promedio de sol anuales. Esto representa un 87,4% del máximo de horas de sol disponibles (Figura 7). Aunque se presenta un leve descenso en el verano, producto de la incursión de nubosidad que es transportada desde el altiplano durante el fenómeno conocido como "invierno boliviano".

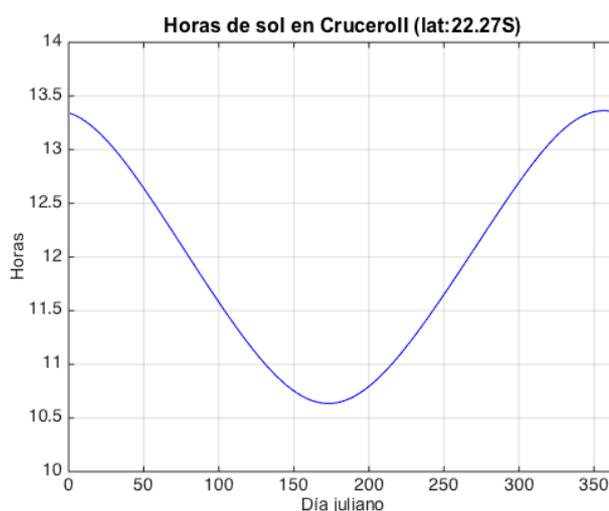


Figura 7. Horas de sol al año en la estación meteorológica Crucero II.

4 <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region2/clima.htm> (consultada el 27 de agosto de 2017).

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de la estación

Parámetro	Valor
Latitud	22.27 °S
Longitud	69.57 °O
UTM-N	7536680
UTM-E	441659
Elevación	1183 msnm
Datum	WGS 84
Huso	19K

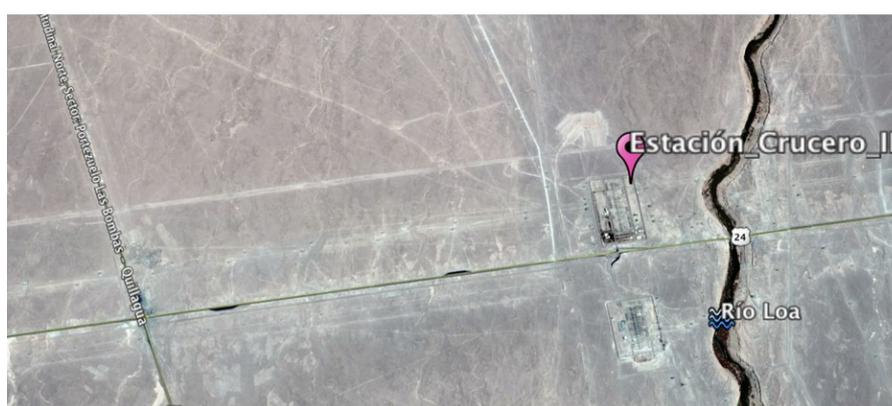


Figura 8. Localización de la estación. © Google.com

4.2 Accesibilidad y Seguridad

Situada en los terrenos privados de una subestación eléctrica, cuenta con acceso restringido, por carretera pavimentada, lo que facilita el cuidado y mantenimiento de los instrumentos. Además, la ubicación, en la esquina noreste del terreno, disminuye la posibilidad de sombras sobre los instrumentos (Figura 9). La subestación, a su vez, se encuentra rodeada por muros de ladrillo con alambres antirrobo en la parte superior.



Figura 9. Vista de la estación meteorológica dentro de la subestación eléctrica. © Google.com

4.3 Alimentación y Comunicación

Los requerimientos de energía de la estación son suministrados por 4 paneles fotovoltaicos y un banco de 6 baterías, esto permite completa autonomía y sobrepasa la necesidad de potencia de la estación. La instalación cuenta con un data logger para la adquisición de datos, que transmite vía sistema GPRS.



Figura 10. Alimentación y comunicación de la estación. © CENMA.

4.4 Equipos de Medición

Lo usual es que las estaciones meteorológicas terrestres, que cuenten con algún instrumento para medir radiación, éste sea sólo para medir irradiancia global horizontal. Esta medida de radiación es la más común dado el uso histórico en aplicaciones agrícolas que ha tenido, especialmente en los procesos de evapotranspiración⁵. Existen otros factores, como los mencionados en el apartado 4.1, que impiden una expansión mayor de estas mediciones, por ejemplo, los costes de adquisición y la operación y mantenimiento (O&M) de las estaciones. Menos usual son las estaciones que cuentan con mediciones directas de GHI y DHI, en el extremo están las estaciones que miden de forma directa DNI.

Los piranómetros y pirheliómetros son dos tipos de radiómetros usados para medir la irradiancia solar. Sus diseños se distinguen por la capacidad de captar la radiación solar de distinta forma. Los pirheliómetros son usados para medir irradiancia directa normal, y los piranómetros para medir irradiancia global y difusa, generalmente, sobre superficie horizontal.

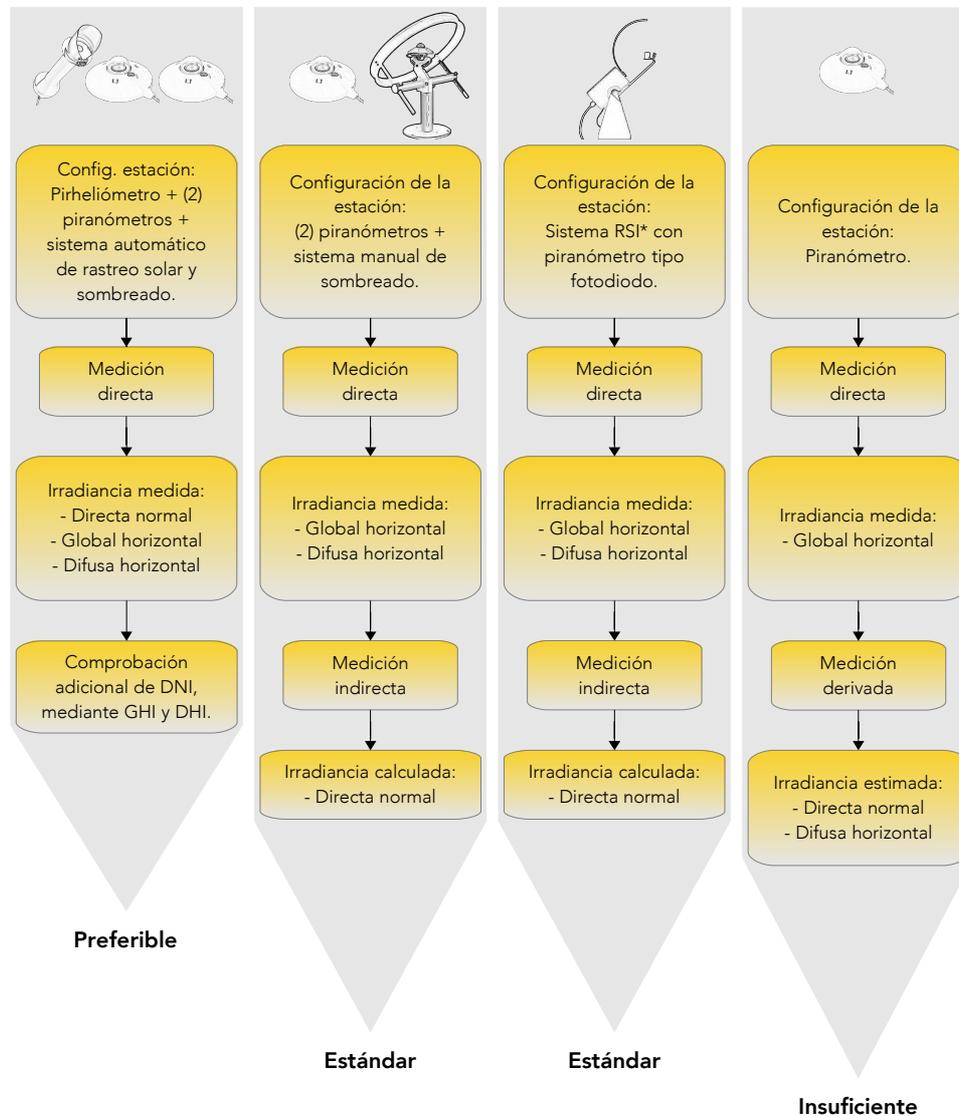
En la tabla siguiente, se resumen algunos atributos claves de estos dos tipos de radiómetros [3].

Tabla 2. Radiómetros

Tipo	Medición	Campo de Visión	Instalación
Pirheliómetro	DNI	5° a 6°	Montado sobre un seguidor solar automático, alineado con el disco solar permanentemente.
Piranómetro	GHI	2 π estereorradián	Montado sobre una superficie horizontal, libre de obstrucciones.
Piranómetro	DHI	2 π estereorradián	Montado sobre un rastreador solar automático, con un mecanismo de sombreado integrado en él, o fija y sombreado mediante una banda manualmente ajustable, en ambos casos en posición horizontal.

5 Se conoce como evapotranspiración, a la combinación de dos procesos: 1. Evaporación desde el suelo y desde la superficie cubierta por las plantas y 2. Transpiración desde las hojas de las plantas. Uno de los factores implicados en estos procesos es la radiación solar. (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, <http://www.mapama.gob.es> (consultada el 19 de septiembre de 2017)).

Dado que el objeto de la aplicación de esta Norma está asociado a proyectos de centrales termosolares, lo ideal es contar con la mejor calidad en las mediciones, que sea posible. A continuación, se presenta un esquema que muestra de forma cualitativa, posibles configuraciones de radiómetros en estaciones meteorológicas terrestres, cuyo fin principal sea la componente directa de la radiación.



*RSI (Rotating Shadowband Irradiometer): Sistema compuesto por un piranómetro el cual es periódicamente sombreado por una banda que se cruza por el campo de visión del fotodiodo.

Figura 11. Configuraciones usuales de radiómetros en estaciones terrestres. Calificadas cualitativamente según sus mediciones de DNI.

Además de una adecuada configuración, la Organización Mundial de Meteorología (WMO) en su guía: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Geneva, Switzerland, 2008), y la Organización Internacional de Normalización (ISO) en su normativa 9060:1990 (Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. Geneva, Switzerland), clasifican a piranómetros y pirheliómetros según sus características operacionales. Por tanto,

es necesario buscar la mejor combinación posible entre configuración de la estación y equipos de calidad para reducir al máximo los errores e incertidumbres en las mediciones.

La estación meteorológica Crucero II actualmente cuenta con una configuración preferible, de acuerdo al esquema anterior. Los instrumentos de medición instalados se enumeran en la tabla siguiente (para conocer sus características técnicas ver Anexo C).

Tabla 3. Equipos instalados.

Equipo	Cantidad
Anemómetros	2
Veleta	1
Termómetro	1
Higrómetro	1
Piranómetros	2
Pirheliómetro	1

A continuación, las figuras muestran los equipos de medición tal y como están instalados en la estación Crucero II.

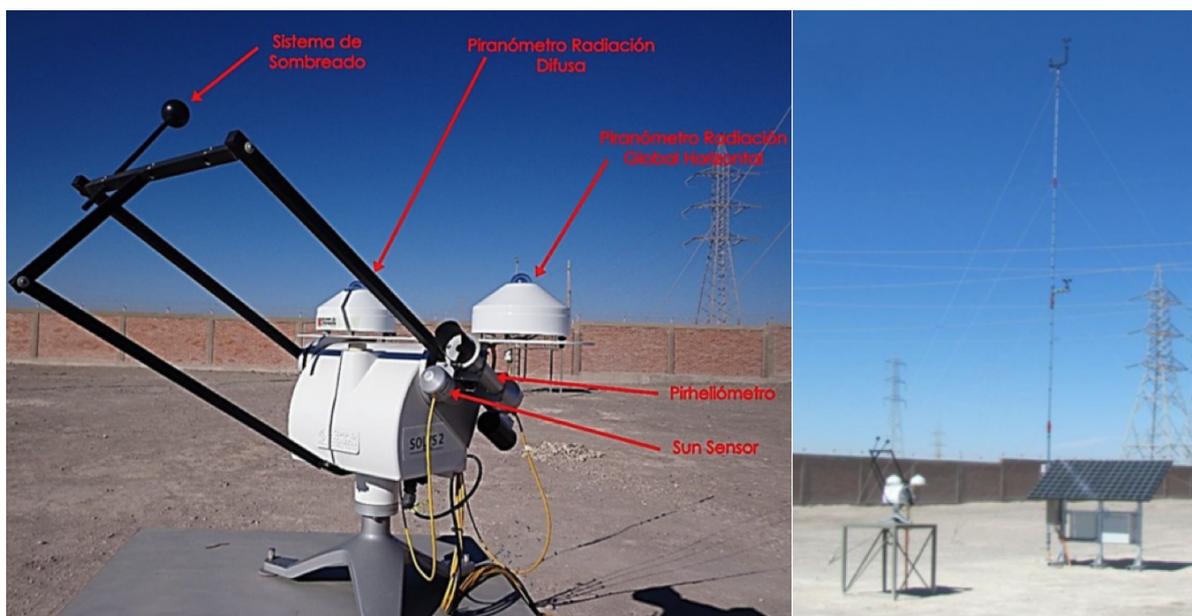


Figura 12. Equipos de medición de radiación solar y vista completa de la estación. © CENMA.



Figura 13. Equipos de medición adicionales: dirección, velocidad del viento y temperatura. © CENMA.

4.5 Variables Medidas en la Estación

El escaneo de canales de medición, se realiza cada 1 segundo. El intervalo de registro en la memoria del data logger está fijado en 10 minutos, es decir, cada 10 minutos se archivan los promedios de las mediciones escaneadas cada 1 segundo (600). La información de cuando se registran los promedios es muy relevante, ya que todos los cálculos astronómicos se sitúan en la mitad del intervalo para representar lo mejor posible las condiciones del momento, en este caso la media se registra al final de un intervalo de 0-10 minutos, por tanto, los cálculos se sitúan en el minuto 5. La configuración de la estación registra las variables que se indican en la tabla siguiente.

Tabla 4. Variables incluidas en el ASR, en orden de relevancia.

Variable Medida	Abreviatura	Unidades	Altura de Medición [m]	Estadístico	Frecuencia	Relevancia
Irradiancia directa normal	DNI	[W/m ²]	1.78	Media	10 min	Obligatoria
Irradiancia global horizontal	GHI	[W/m ²]	1.78	Media	10 min	Recomendable
Irradiancia difusa horizontal	DHI	[W/m ²]	1.78	Media	10 min	Recomendable
Temperatura ambiente	TEMP	[°C]	2.00	Media	10 min	Complementaria
Humedad relativa	HR	[%]	2.00	Media	10 min	Complementaria
Velocidad del viento	W_6	[m/s]	6.20	Media	10 min	Complementaria
Velocidad del viento	W_12	[m/s]	12.00	Media	10 min	Complementaria
Dirección del viento	W_Dir	[°] Sexagesimales	11.65	Media	10 min	Complementaria

4.6 Operación y Mantenimiento (O&M)

Normalmente no se tiene información sobre los procesos de O&M de las estaciones meteorológicas terrestres, lo cual ayudaría sin duda a relacionar mediciones desviadas con problemas en

los instrumentos de la estación. Este proceso abarca en gran medida los procedimientos de calibración, inspección y mantenimiento, junto con hojas de registro y otros ítems que documentan la condición de la estación.

Favorablemente, la estación Crucero II cuenta con un riguroso plan de operación y mantenimiento que está a cargo de la Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) [15], y consiste en:

- Limpieza diaria de los domos de los piranómetros y ventana del pirheliómetro, limpieza de filtros de los ventiladores, verificar horizontalidad, mantener el seguidor solar alineado y reemplazo del desecante.
- Visitas mensuales de mantenimiento preventivo, con operador técnico local.
- Registro de visitas de la estación (bitácora), incluyendo las operaciones de limpieza realizadas mensualmente.
- Visitas trimestrales de personal técnico CENMA y elaboración de reporte de mantenimiento.
- Entrega de datos crudos (archivos diarios) y archivos mensuales en planilla electrónica.
- Calibrado cada dos años (según especificación del fabricante).

5 Aplicación de la Norma al Emplazamiento

5.1 Base de Datos de la Campaña de Medidas

Generalmente los datos crudos, es decir, obtenidos directamente del data logger, requieren tratamientos previos a la aplicación de un control de calidad, debido principalmente a que no hay un estándar que establezca un formato para estos archivos.

La base de datos cuenta con 8 variables (ver sección 4.5), de las cuales 3 serán objeto de análisis en este trabajo; DNI, GHI y DHI. La base abarca desde 2013 a 2016 con registros cada 10 minutos, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 5. Extracto de la base de datos utilizada para crear la campaña de medidas.

"Fecha Hora (YYYY-MM-DD HH:MM)", "Radiación Solar Global Horizontal [mean,W/m2]", "Radiación Directa Normal [mean,W/m2]", "Radiación Solar Difusa [mean,W/m2]", "Temperatura [mean,C]", "Humedad Relativa [mean,%]", "Velocidad de viento en 6.0 metros [mean,m/s]", "Velocidad de viento en 12.0 metros [mean,m/s]", "Dirección del viento en 12.0 metros [mean,grados]"
"2013-01-01 00:00",0.0,0.0,0.0,15.90,9.6,1.20,1.80,239.00
"2013-01-01 00:10",0.0,0.0,0.0,15.20,9.8,1.40,2.00,232.00
"2013-01-01 00:20",0.0,0.0,0.0,14.40,10.0,1.20,2.00,234.00
"2013-01-01 00:30",0.0,0.0,0.0,14.30,9.8,1.40,2.00,223.00
"2013-01-01 00:40",0.0,0.0,0.0,14.00,9.8,1.40,1.80,215.00
"2013-01-01 00:50",0.0,0.0,0.0,13.60,9.8,1.30,1.70,225.00
"2013-01-01 01:00",0.0,0.0,0.0,13.00,9.7,1.20,1.50,234.00
"2013-01-01 01:10",0.0,0.0,0.0,12.80,9.8,1.20,1.80,230.00

```

...
"2013-01-01 04:40",0.0,0.0,0.0,8.20,13.5,1.80,2.60,214.00
"2013-01-01 04:50",0.0,0.0,0.0,8.70,13.9,1.70,2.40,215.00
"2013-01-01 05:00",0.0,0.0,0.0,8.60,14.3,2.40,3.30,217.00
"2013-01-01 05:10",0.0,0.0,0.0,8.60,14.4,2.30,3.10,219.00
"2013-01-01 05:20",0.0,0.0,0.0,8.20,14.7,2.30,3.30,227.00
"2013-01-01 05:30",0.0,0.0,0.0,7.60,14.5,2.30,3.20,228.00
"2013-01-01 05:40",0.0,0.0,0.0,7.00,14.5,3.10,3.80,218.00
"2013-01-01 05:50",0.0,0.0,0.0,6.90,14.6,2.50,3.10,215.00
"2013-01-01 06:00",2.6,0.0,2.6,7.50,14.7,2.10,3.00,220.00
"2013-01-01 06:10",7.8,1.1,7.8,8.10,14.5,2.50,3.20,197.00
"2013-01-01 06:20",22.8,105.6,17.3,7.90,14.7,3.40,4.10,183.00
"2013-01-01 06:30",61.4,379.9,28.1,9.00,14.1,3.70,4.30,189.00
"2013-01-01 06:40",96.0,484.3,35.9,10.60,13.4,2.70,3.40,197.00
"2013-01-01 06:50",134.0,576.5,41.3,10.30,13.1,3.40,4.00,181.00
"2013-01-01 07:00",176.1,655.6,46.5,11.30,13.0,2.40,2.90,203.00
"2013-01-01 07:10",216.8,702.8,51.9,11.70,12.7,2.50,2.90,211.00
"2013-01-01 07:20",260.2,748.0,57.3,12.10,12.2,2.70,3.00,200.00
"2013-01-01 07:30",303.5,783.2,62.4,13.30,11.7,3.00,3.20,202.00
"2013-01-01 07:40",346.7,815.1,66.3,14.10,11.3,3.70,3.80,189.00
"2013-01-01 07:50",390.5,847.7,68.4,16.00,10.4,2.90,3.10,175.00

```

Los tratamientos previos realizados a la base de datos son los siguientes:

- Inspección visual; donde es posible distinguir caracteres que no son números, o bien, saltos en blanco en la continuidad de los registros.
- De formato; datos entre comillas, como la fecha por ejemplo, donde es necesaria la separación en años, meses, días, horas y minutos, cada uno en una columna. La puntuación decimal debe corresponder con el separador de miles de cada ordenador.
- Comprobación básica de integridad; dependiendo de la frecuencia de los registros, la cantidad de años y si hay años bisiestos en la base, se puede comprobar que en este caso la base debe contener $(365 \times 24 \times 6) \times 3 + (366 \times 24 \times 6) \times 1 = 210384$ registros.

También es importante conocer de que forma se identifica a los datos erróneos o perdidos, normalmente se utilizan expresiones como: NaN (Not a Number), espacio en blanco entre comas, -999 o 0. En caso de ser números como el "cero", hay que poder distinguir entre mediciones válidas o no, es decir, hay datos válidos con valor cero.

5.2 Control de Calidad (CC) de Datos e Interpretación del Etiquetado

En este trabajo el CC es realizado mediante la aplicación de la metodología de CC propuesta por la BSRN [2] (ver Anexo A). Como resultado del CC los datos son etiquetados, informando de la última prueba que cumplen. La interpretación del etiquetado para la identificación de datos erróneos se lleva a cabo mediante su representación gráfica [13], y su equivalencia se puede ver en la (Tabla 6).

Las pruebas I y II de la BSRN definen límites independientes para cada variable. Sin embargo, la tercera prueba define dos conjuntos de ecuaciones [Ec. 12, 13, 14, 15, 16 y Ec. 17, 18] donde más de una variable es utilizada. Este trabajo adopta las condiciones impuestas por Moreno, Ramírez & Silva [13] donde

las mediciones de GHI y DNI se considera que cumplen con la tercera prueba cuando están dentro de los límites definidos por las ecuaciones 12, 13, 14, 15 y 16. La tercera prueba no puede ser aplicada si cualquiera de las variables no ha pasado la segunda prueba. Para que las mediciones de DHI cumplan con la tercera prueba, estas deben estar dentro de los límites impuestos en las ecuaciones 17 y 18.

El etiquetado de las variables ocurre en forma secuencial, a medida que se van aplicando cada una de las pruebas en orden. Las primeras dos pruebas analizan cada variable en forma independiente, y la primera prueba es prerequisite para aprobar la segunda. Luego la tercera prueba utiliza la dependencia física que tienen las variables, a diferencia de las pruebas anteriores, para pasar esta última prueba, como se dijo antes, es prerequisite que todas las variables hayan aprobado la segunda prueba.

Los datos de las variables que hayan sido etiquetados con el número 3, son datos aptos y por tanto pueden pasar a formar parte del ASR. Los datos etiquetados con 1 y 2, son datos anómalos que deben ser revisados y corregidos previamente para poder entrar en el ASR.

Tabla 6. Descripción del etiquetado como resultado del CC.

Leyenda	Etiqueta (última prueba que cumplen)	Descripción	Acción
	3	Datos APTOS	Ninguna
	2	Datos NO APTOS	Revisión visual y corrección con criterios
	1	Datos NO APTOS	Revisión visual y corrección con criterios
	0	Datos NO APTOS o No hay datos	Revisión visual y corrección con criterios si corresponde

Aunque las pruebas se adaptan a todas las latitudes y climas de las estaciones de la BSRN, se pueden adecuar las ecuaciones (los límites) a latitudes y climas específicos para lograr mejor precisión en las pruebas, evitando descartar datos aptos [2], lo cual debe hacerse lógicamente antes de aplicar cualquier criterio de corrección a las mediciones.

5.2.1 Adaptación de las Pruebas a las Condiciones del Emplazamiento

Lo siguiente es una adaptación a las condiciones impuestas por las ecuaciones 9, 10 y 11 (ver Anexo A), tiene que ver con el ángulo cenital (θ_z) y su variación en los límites del día. En la Figura 14 se muestra esta situación ejemplificada para la variable DNI.

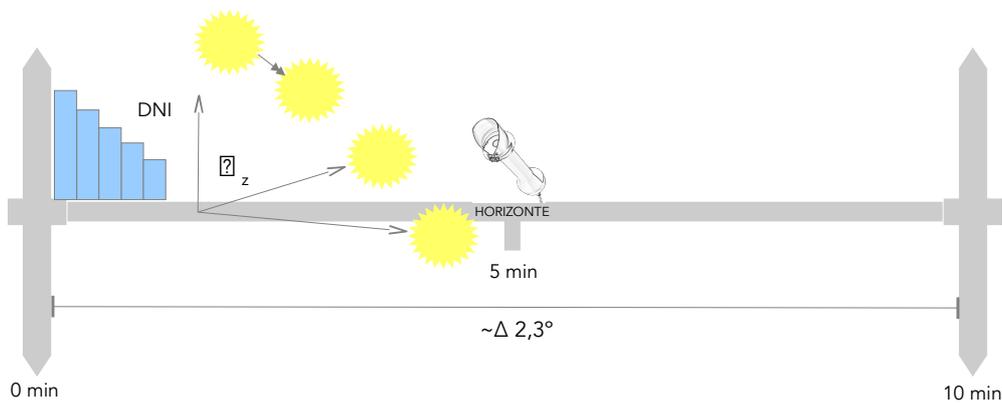


Figura 14. Representación de los casos en que el ángulo cenital pasa los 90° antes de los primeros 5 minutos.

La Figura 14 representa aquellos casos particulares en que $\theta_z > 90^\circ$ al momento de realizar los cálculos astronómicos, lo que ocurre en mitad del intervalo como en el resto de las mediciones, sólo que al estar el sol bajo el horizonte en el sub-intervalo 0-5 min, no quiere decir que no hubiese valores de irradiancia al comienzo del intervalo. La restricción impuesta por la segunda prueba es que para todos los datos donde $\theta_z \geq 90^\circ$, la ecuación 11 se reduce a $-2 \text{ [W/m}^2\text{]} < \text{DNI} \leq 10 \text{ [W/m}^2\text{]}$, por tanto, cuando las mediciones de DNI promedian más que $10 \text{ [W/m}^2\text{]}$, el dato no cumple la segunda prueba. Esto no es del todo preciso para el emplazamiento en estudio, que como se describió en la sección 4.1, cuenta con condiciones privilegiadas de radiación solar.

Para subsanar estas situaciones límites, se ha comprobado empíricamente con las mediciones, que es posible una adaptación, basada en la variación de $\sim 2,3^\circ$ que tiene θ_z en el último intervalo de 10 minutos del día, con radiación directa. Con este dato, se ha optado por ampliar moderadamente, o bien, en un valor promedio de $\sim 0,6^\circ$ que corresponde aproximadamente a la mitad del sub-intervalo 0-5 min. En esos minutos iniciales se considera que pasan la segunda prueba todas las mediciones comprendidas entre $90^\circ < \theta_z < 90,6^\circ$, para las medidas con $\theta_z \leq 90^\circ$ se aplica la ecuación 11 y cuando $\theta_z \geq 90,6^\circ$ la medida puede tomar un valor máximo de $10 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

5.3 Aplicación del Control de Calidad a la Campaña de Medidas

La aplicación del CC a las bases de datos se realiza por cada uno de los años que componen la campaña de medidas. A continuación se muestran los resultados para tales años. En cada uno se estudia un conjunto de 4 gráficos.

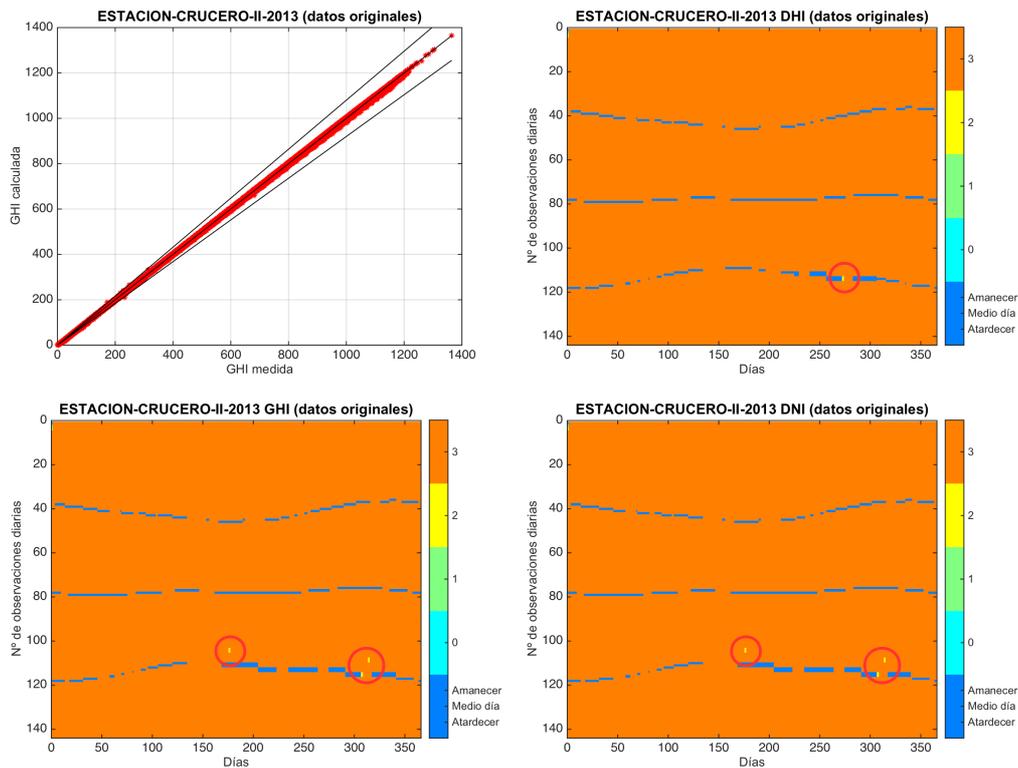


Figura 15. Primer CC a los datos de 2013. En un círculo los datos que presentan anomalías.

El primer gráfico, del conjunto de gráficos de arriba (esquina superior izquierda), muestra la dispersión entre los datos de GHI [W/m^2] medidos y calculados [Ec.1] entre bandas de +/- un 8%. Este gráfico representa la correlación que hay entre las dos variables, indicando si los datos medidos son interpretados por su modelo físico con mayor o menor precisión. El resto de gráficos, muestran los datos etiquetados de DHI, GHI y DNI [W/m^2] diarios a lo largo de un año con frecuencia 10 minutal, es decir, cada uno representa a 52560 mediciones anuales (no bisiesto). A cada medición se le ha asignado un color y cada color representa a una etiqueta, como se describió en la Tabla 6. Cuando un dato aislado es anómalo, se ve como un punto de color celeste, verde o amarillo, según las pruebas que haya pasado. Las líneas azules marcan el amanecer, medio día solar y atardecer para cada día del año, y como se observa, hay menos horas de sol los meses de otoño-invierno.

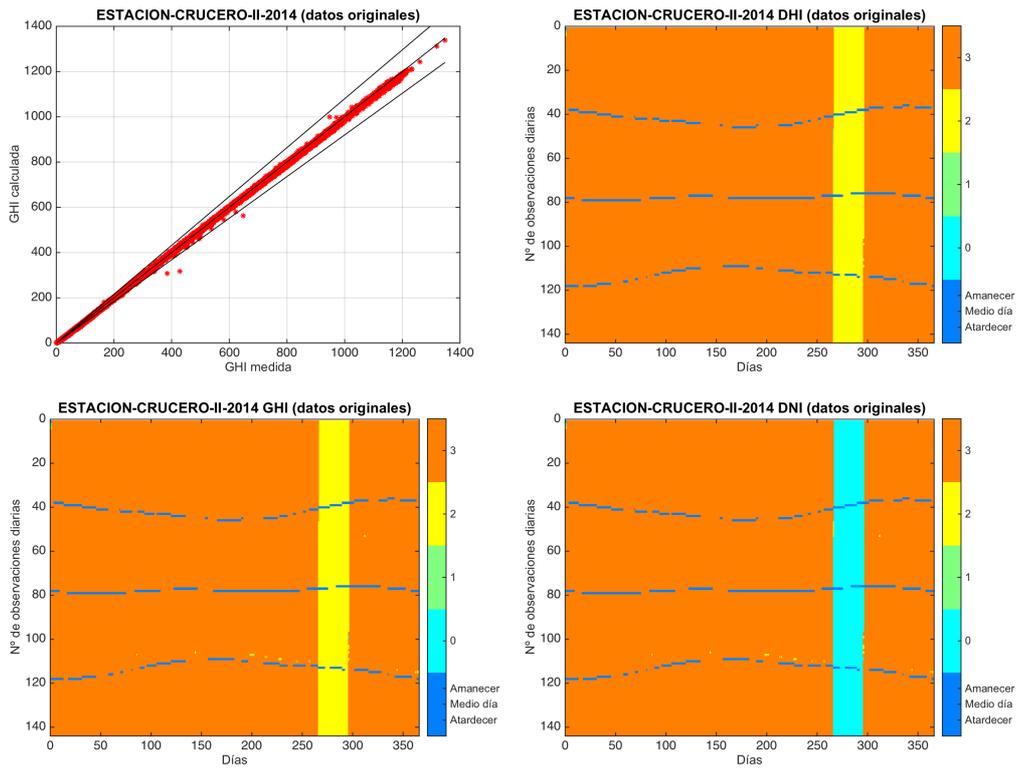


Figura 16. Primer CC a los datos de 2014.

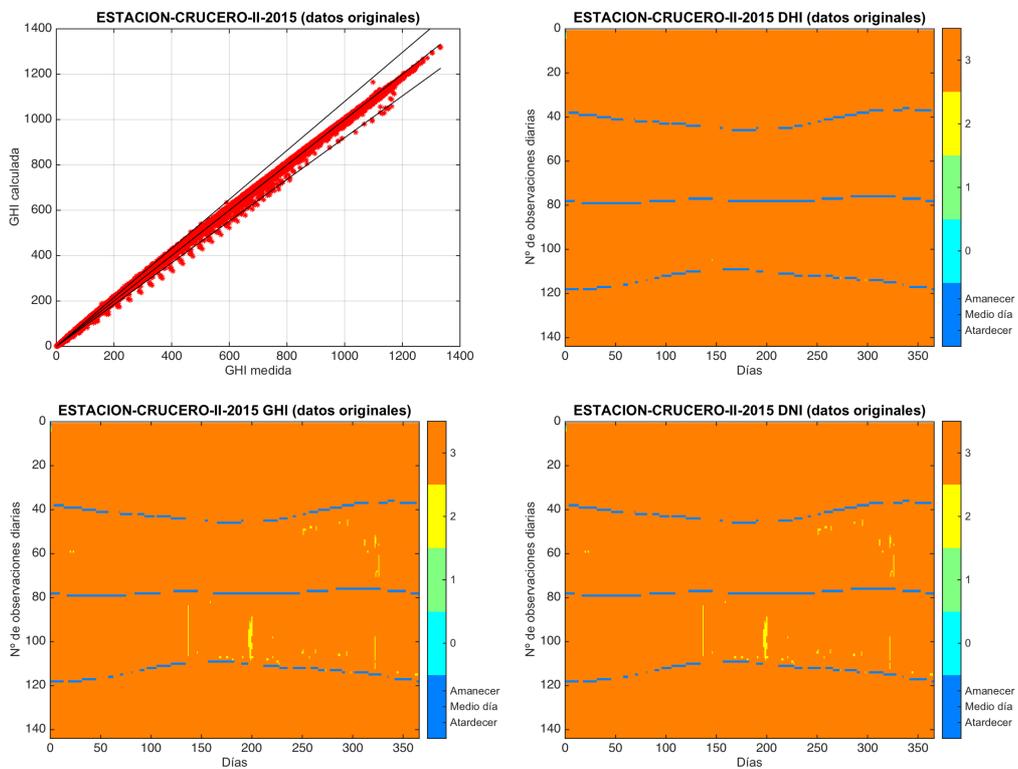


Figura 17. Primer CC a los datos de 2015.

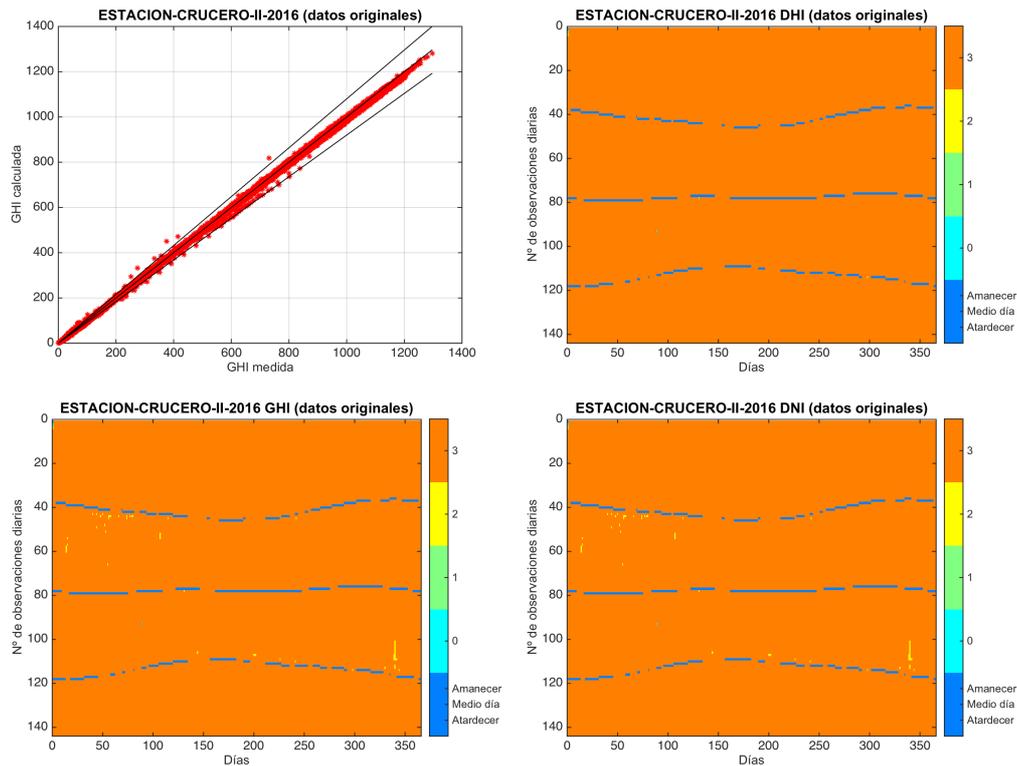


Figura 18. Primer CC a los datos de 2016.

5.3.1 Análisis de los Resultados del Primer CC

El primer CC a las mediciones pone en evidencia cuales son anómalas. Estas anomalías pueden deberse a pequeñas desviaciones en las pruebas más restrictivas o por el contrario a datos lejos de los límites físicamente posibles. Ocasionalmente, pueden haber mediciones correctas que superan los límites físicamente posibles debido a procesos de refracción, de reflexiones entre nubes dispersas y superficies brillantes, compensaciones nocturnas, etc. Por lo tanto, los resultados de todas estas pruebas deben ser confirmados por inspección visual de los datos. Una eliminación automática de los datos que excedan los límites de las pruebas podría resultar en una pérdida de mediciones reales y, por lo tanto, no se recomienda [16].

Con respecto a las bases de datos que conforman la campaña de medidas de este trabajo (2013 a 2016), en general presentan alta correlación entre GHI medida y GHI calculada y también alta calidad en sus mediciones, esto está avalado por lo comentado en la sección 4, sobre los equipos de medición instalados, la configuración y la O&M de la estación Crucero II. Aún así hay datos que no son aptos, teniendo 2013 menos de 0,008%, 2014 menos de 8,53%, 2015 menos de 2% y 2016 menos de 0,36% de sus mediciones de DNI no aptas.

El problema más evidente ocurre en 2014, entre el 23/09 y el 23/10 inclusivos. Se observa en la

Figura 16 como una franja celeste vertical, donde la DNI no tiene datos, lo que afecta al resto de variables que no pueden pasar la tercera prueba sin datos de DNI. Esto está informado en el reporte trimestral de mantenimiento (octubre a diciembre) y se ha debido a daños en el cable del pirheliómetro.

El año 2013 cuenta con pocos registros no aptos, el gráfico siguiente muestra un día en el cual hay un dato o registro no apto a las 18:05 del 03/10.

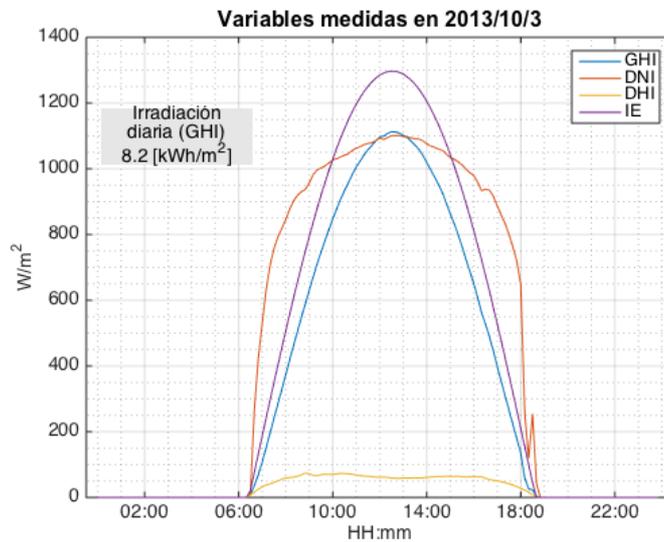


Figura 19. Variables medidas en 2013/10/03 con un dato anómalo a las 18:05. (IE: irradiancia extraterrestre)

Puede haber datos no aptos aislados como en el gráfico anterior, o un conjunto de medidas no aptas dentro de un día, en ese caso como se verá más adelante, si superan cierto límite, convierten al día en un día no válido. Esto se observa en el siguiente gráfico de un día no válido en 2015.

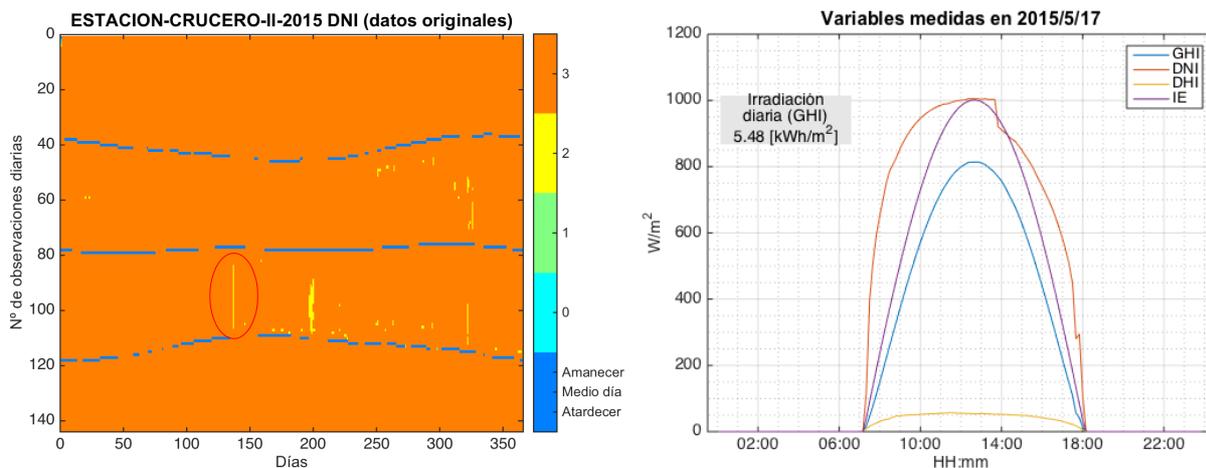


Figura 20. Variables medidas en 2015/05/17 con datos anómalos a partir de las 13:45 hasta las 17:25. En un círculo rojo se representan estos datos en el gráfico de DNI de etiquetas a la izquierda.

El primer CC para el año 2016, muestra al inicio del año, particularmente en la segunda quincena de febrero una concentración de datos anómalos (Figura 18), en ese período la región de Antofagasta tuvo varios días nublados. Aunque no debería existir una correlación positiva entre días nublados y datos no aptos, puede ocurrir que las variables medidas sobrepasen los límites habituales en algunos casos, como se observa en la Figura 21, donde $GHI = 732 [W/m^2]$, $DHI = 699 [W/m^2]$ y la $DNI = 141 [W/m^2]$ a las 10:45.

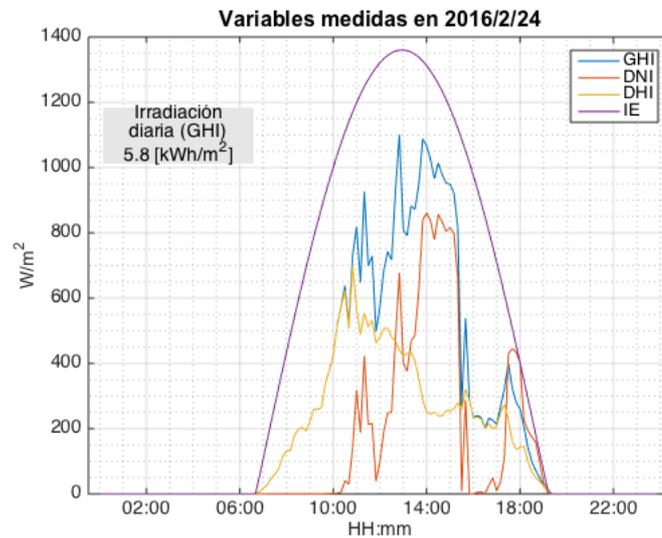


Figura 21. Variables medidas en 2016/02/24 con un dato anómalo a las 10:45. (IE: irradiancia extraterrestre)

5.3.2 Criterios de Corrección (Remplazo de Datos no Aptos)

Los siguientes criterios usados para corregir los datos no aptos, son particulares y exclusivos para las bases de datos utilizadas en este trabajo, por tanto, deben revisarse antes de su aplicación a otras bases de datos. Estos criterios han sido aplicados a todas las bases de datos cuya frecuencia temporal de los registros es mayor o igual a una (1) hora.

Previo a la validación, todos los datos no aptos son separados y contabilizados en el período de un día, los que excedan lo establecido en la Norma, pasan a formar parte de un día no válido. Aquellos datos no aptos pero que pertenecen a días válidos, son corregidos con criterios a propósito y exclusivos para el tipo de dato no apto, y como menciona la Norma, corregidos coherentemente antes de proceder a la validación mensual.

Puesto que la variable fundamental es la DNI, ésta es la variable que dirige la mayoría de los procesos de corrección, sustitución y validación.

No Cumplen la Primera Prueba de la BSRN (Etiqueta: 0)

Es poco común ver datos que sobrepasen los límites físicamente posibles, de encontrarse, se pueden corregir por ejemplo, ajustándose al límite más cercano máximo o mínimo según sea el caso. En este trabajo, este tipo de casos se debe a situaciones en las que no hay mediciones y dependerá de la cantidad de información perdida si se puede o no reparar la base de datos, en casos aislados donde falte un dato puntual, con la media se estiman los datos perdidos. En otros casos, pueden afectar a la validez de días enteros o meses (Figura 16).

No Cumplen la Segunda Prueba de la BSRN (Etiqueta: 1)

Esta prueba es sensible mayormente para las mediciones que se encuentran en los límites del día solar, es decir, al amanecer y al ocaso. A las mediciones de DNI que no cumplen con esta prueba, se les han aplicado los siguientes criterios:

1. Si la medición que sigue a la no apta es igual a cero, entonces el valor que se asigna a la variable es el máximo permitido por la ecuación 11, es decir, 10 [W/m²], como se observa en el siguiente ejemplo (Figura 22 y Tabla 7) para una medición de 2013, la medida de DNI (columna 8) no cumple con la segunda prueba (etiqueta 1 en columna 9), ya que cuando $\theta \geq 90,6^\circ$ (ver sección 5.2.1) la ecuación 11 se reduce a que $-2 \text{ [W/m}^2\text{]} < \text{DNI} \leq 10 \text{ [W/m}^2\text{]}$, por tanto, el máximo valor permitido para la DNI, con ángulo cenital sobre $90,6^\circ$, es 10 [W/m²].

datoscc.matc

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
38989	2013	9	28	17	55	124.9000	3	627.3000	3	24.4000	3
38990	2013	9	28	18	5	70.8000	3	426	3	19.4000	3
38991	2013	9	28	18	15	37.9000	3	317.4000	3	13.7000	3
38992	2013	9	28	18	25	17.3000	3	180.9000	3	7.1000	3
38993	2013	9	28	18	35	1.5000	2	11.9000	1	1	2
38994	2013	9	28	18	45	0	3	0	3	0	3
38995	2013	9	28	18	55	0	3	0	3	0	3
38996	2013	9	28	19	5	0	3	0	3	0	3
38997	2013	9	28	19	15	0	3	0	3	0	3

Figura 22. Medidas del 28/09/2013 a las 18:35, etiquetadas de acuerdo a la metodología de la BSRN.

Tabla 7. Ejemplo de la aplicación de un criterio a un dato no apto.

ID	ϵ_0	$\text{Cos}(\theta) z$	θz	DNI original	DNI corregida
38993	0,9984	- 0,0137	90,785°	11,9	10

2. Si la medida no apta está entre dos medidas aptas mayores que cero, entonces el criterio que se usa es la media entre esas dos mediciones aptas.

3. Con respecto a las variables GHI y DHI, se revisan con el mismo procedimiento.

No Cumplen la Tercera Prueba de la BSRN (Etiqueta: 2)

Esta prueba analiza la relación y coherencia entre las variables, aplicando límites entre los que deberían situarse estas relaciones. Dado que esta prueba involucra a las demás variables, no necesariamente cuando un dato de DNI esté etiquetado 2 o no apto éste deba corregirse, sino que puede ser efecto del resto de variables. Los criterios aplicados a las variables DNI y GHI se definen a continuación.

Para los datos no aptos donde $0 \leq z < 75^\circ$;

Si, $GHI < 0,92 * (DNI * \cos(z) \mp DHI)$ es decir, no cumple la ecuación 14, entonces se redondea al entero más cercano mayor o igual que resulta de $GHI = 0,92 * (DNI * \cos(z) \mp DHI)$.

Sino, se corrige la DNI, calculada ésta en función de las otras variables, restando 1/100 al factor numérico de la ecuación 13, resultando que $DNI = (GHI/1,07 - DHI) / \cos(z)$.

Para los datos no aptos donde $75^\circ \leq z < 93^\circ$;

Si, $GHI < 0,85 * (DNI * \cos(z) \mp DHI)$ es decir, no cumple la ecuación 16, entonces se redondea al entero más cercano mayor o igual que resulta de $GHI = 0,85 * (DNI * \cos(z) \mp DHI)$.

Sino, se corrige la DNI, calculada ésta en función de las otras variables, restando 1/100 al factor numérico de la ecuación 15, resultando que $DNI = (GHI/1,14 - DHI) / \cos(z)$.

5.4 Procedimiento de Validación

Los resultados del primer control de calidad (CC1) dan paso al proceso de validación diaria, que consiste en revisar la información y aplicar los criterios del punto anterior a los datos no aptos. Se genera así la información de un segundo control de calidad (CC2). Y la última etapa se encarga de validar la información mensual (Figura 3). Al igual que en el proceso de CC, las etapas de validación se han implementado mediante programación en MATLAB®.

5.4.1 Validación Diaria

Una vez que cada base de datos ha pasado por el CC1, lo siguiente es determinar qué días son válidos y cuáles no. Aquellos días con datos no aptos pero que no constituyen un día no válido, se corrigen

con los criterios vistos en la sección anterior y los días no válidos se apartan y se estudia si pasan a constituir un mes no válido. Los gráficos del CC2 para cada año de la campaña de medidas se muestran a continuación.

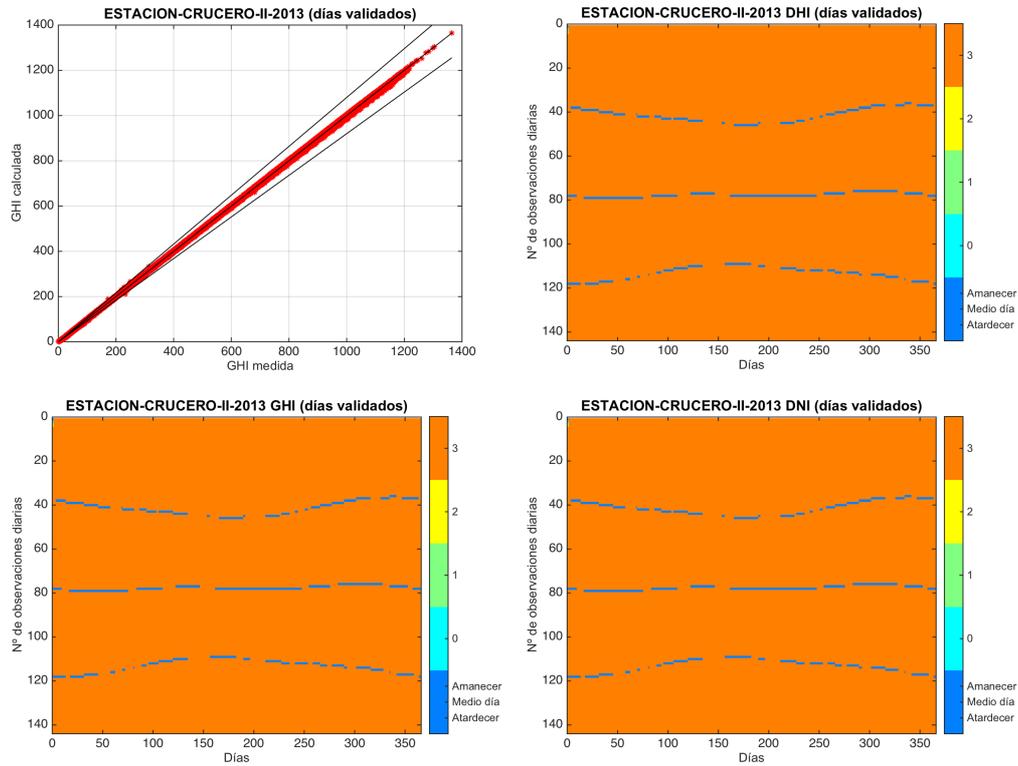


Figura 23. Segundo CC a los datos de 2013, posterior a la aplicación de criterios de corrección.

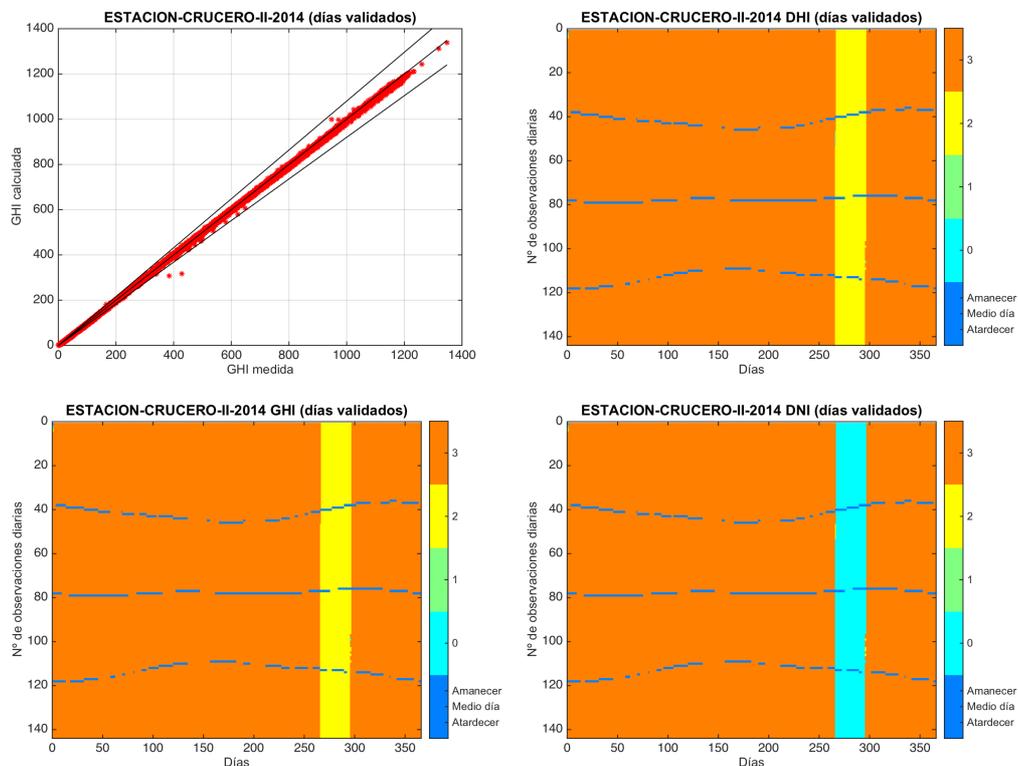


Figura 24. Segundo CC a los datos de 2014, posterior a la aplicación de criterios de corrección.

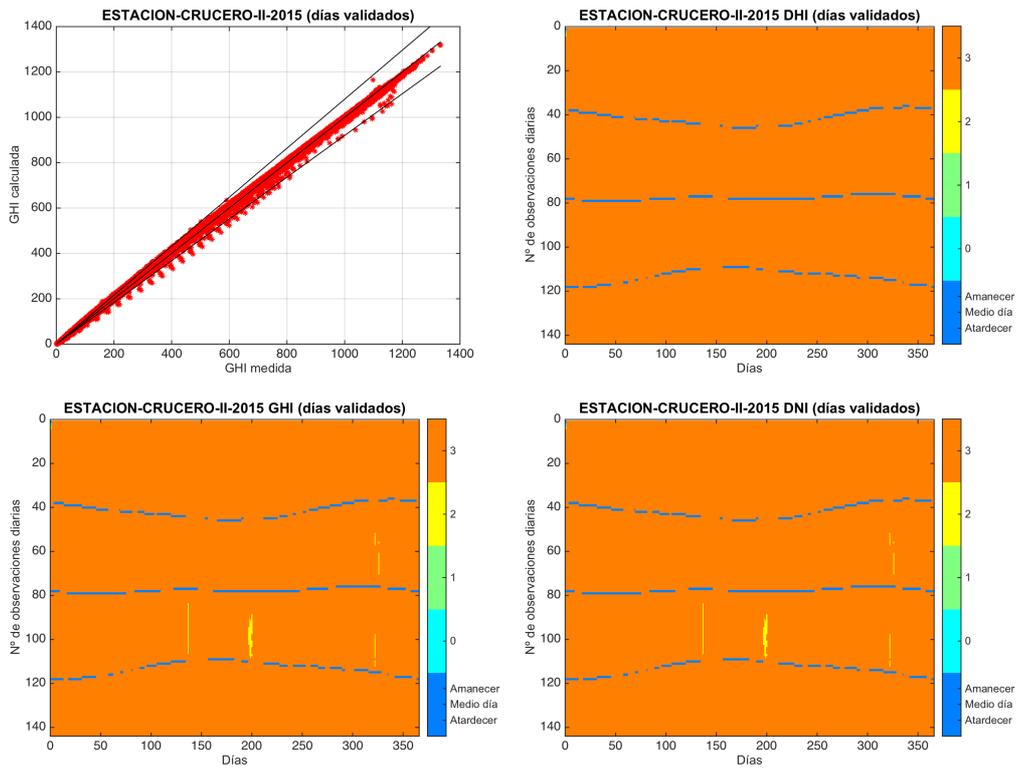


Figura 25. Segundo CC a los datos de 2015, posterior a la aplicación de criterios de corrección.

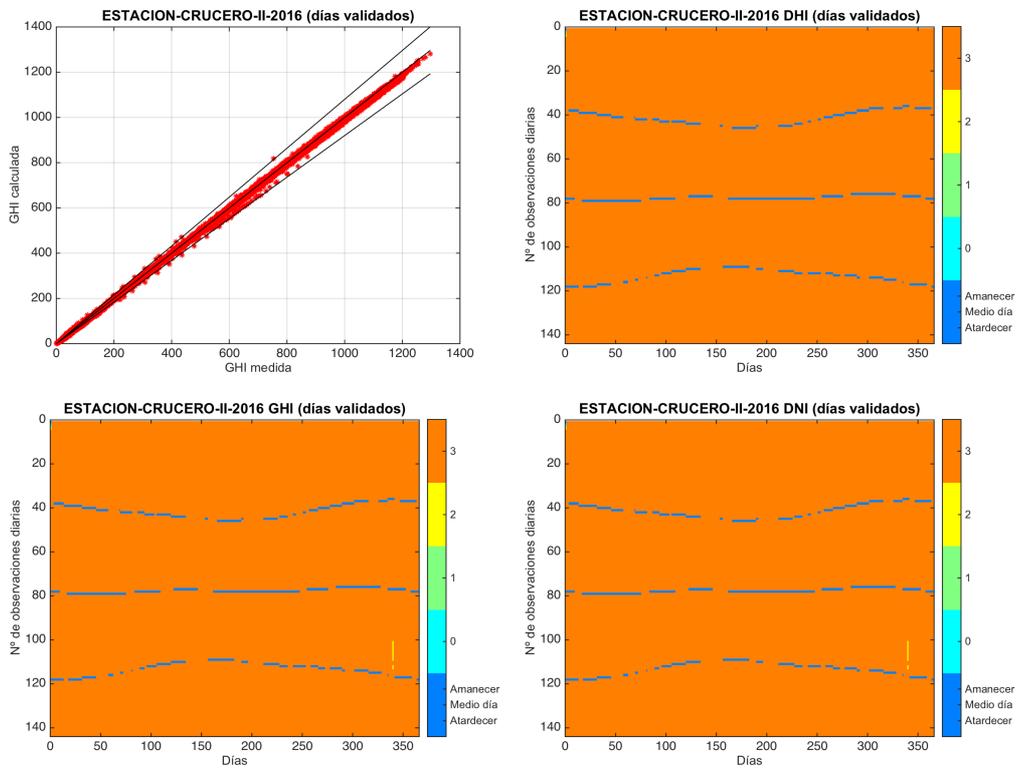


Figura 26. Segundo CC a los datos de 2016, posterior a la aplicación de criterios de corrección.

Como se puede observar en los gráficos del CC2 para cada año, los criterios han corregido los datos anómalos en todos aquellos días en donde no hay más de 6 datos no aptos. Los datos que no han sido corregidos en 2014, 2015 y 2016 es porque pertenecen a días no válidos como se verá en el siguiente punto.

5.4.2 Validación Mensual

El objeto de la validación mensual es conseguir establecer los meses, válidos, por validar y no válidos (Figura 27), para luego trabajar sobre los meses por validar, por tanto, a los años 2013 y 2014 no se les aplica este procedimiento.

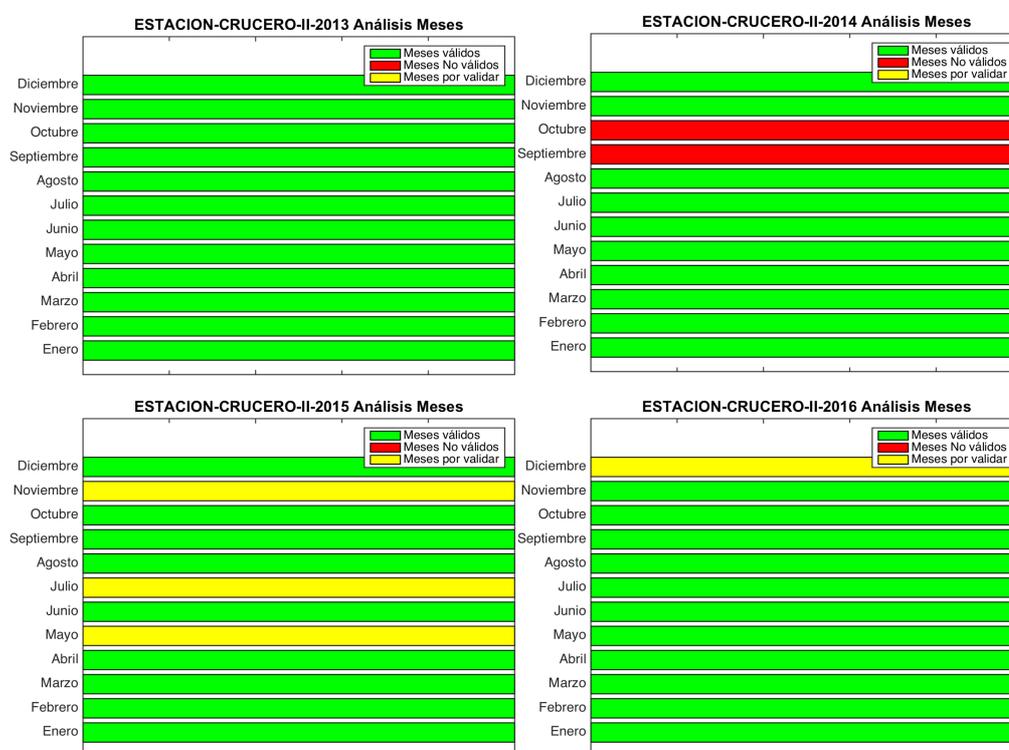


Figura 27. Meses válidos (verde), por validar (amarillos) y no válidos (rojos), para cada base de datos de la campaña de medidas.

Los meses no válidos, no pueden formar parte del ASR, luego ya no se incluyen en ningún análisis posterior, esto ocurre en 2014 con los datos perdidos de DNI e involucran los meses de septiembre y octubre, pasando a ser 2014 un año incompleto. Los meses por validar son aquellos que contienen días no válidos pero que no superan un máximo de 4 días/mes permitidos en la Norma. En la Figura 25, base de datos de 2015, se aprecian estos días como líneas verticales al igual que en diciembre de 2016.

El procedimiento para sustituir días no válidos está definido en la Norma, y consiste en reemplazar el día no válido por otro día válido en su entorno de +/-5 días, que puede ser incluso de otros años. La condición para seleccionar ese día es, a través de, la irradiación diaria y el valor diario medio mensual (VDMM) del mes con el día no válido. El día cuya diferencia absoluta entre irradiación diaria y VDMM sea la menor, será el día que se elija para reemplazar al día no válido. Se reemplaza completamente, es decir, en este estudio las 144 mediciones diarias. En las siguientes figuras, se ejemplifica este procedimiento para el día no válido 05/12/2016.

AÑO	MES	DIA	DNI (IDDS) [kWh/m ²]	IDDS-VDMM
2016	11	30	7,32	3,491
2016	12	1	6,40	4,405
2016	12	2	12,02	1,216
2016	12	3	11,08	0,276
2016	12	4	8,81	1,997
2016	12	5	11,55	
2016	12	6	11,47	0,663
2016	12	7	11,57	0,766
2016	12	8	11,11	0,304
2016	12	9	11,42	0,612
2016	12	10	11,48	0,670
2016	12	11	11,43	
2016	12	12	11,88	
....	

VDMM: Valor Diario Medio Mensual
 IDDS: Irradiación Diaria Día Sustituto
 : Día no válido

VDMM: 10,81

MENOR DIFERENCIA

Figura 28. Procedimiento para sustituir el día no válido 05/12 de 2016.

AÑO	MES	DIA	DNI (IDDS) [kWh/m ²]	IDDS-VDMM
2013	11	30	11,77	0,960
2013	12	1	11,67	0,863
2013	12	2	11,82	1,010
2013	12	3	10,44	0,366
2013	12	4	10,21	0,603
2013	12	5	9,77	1,037
2013	12	6	10,90	0,089
2013	12	7	10,65	0,161
2013	12	8	10,49	0,320
2013	12	9	11,13	0,317
2013	12	10	11,25	0,445
2013	12	11	11,54	
2013	12	12	11,66	
....	

VDMM: Valor Diario Medio Mensual
 IDDS: Irradiación Diaria Día Sustituto

MENOR DIFERENCIA

Figura 29. Días candidatos de 2013 para sustituir el día no válido 05/12 de 2016.

Como se observa en las Figuras 28 y 29, el 03/12/2016 puede reemplazar al día no válido, pero en 2013 el 06/12 resulta una mejor opción al tener menor diferencia entre irradiación diaria y VDMM, lo mismo se ha constatado para las bases de datos de 2014 y 2015. Por tanto, todas las mediciones del día

06/12/2013 reemplazan a las del día 05/12/2016.

Para confirmar la validación mensual (2015 y 2016), es decir, que los meses por validar hayan sido corregidos, se generan los gráficos CC3, los cuales se pueden revisar en el Anexo B, y que muestran todos los registros corregidos. De este modo, es posible continuar con la siguiente parte de la metodología del ASR.

5.5 Determinación del VMR utilizando varias Fuentes de Información

Como resultado de los procedimientos de la campaña de medidas, se obtienen las bases de datos revisadas y validadas, las cuales se complementarán con otras fuentes de datos estimados de GHI, con el objeto de conseguir un único valor mensual representativo del comportamiento a largo plazo del recurso solar para cada mes del año.

5.5.1 Fuentes de Datos Estimados Complementarias

Los registros de las fuentes complementarias son estimaciones de modelos basados en datos satelitales, que en su conjunto suman 24 años de datos, abarcando distintos períodos cada una. En todas las fuentes se realizaron controles de calidad año por año, similares a los aplicados en la campaña de medidas pero adaptándolos a las diferentes frecuencias temporales de los datos estimados. Las características más relevante se sintetizan en una primera tabla, en otra se han contrastado las fuentes con los años completos (2013, 2015 y 2016) de la campaña de medidas en Crucero II, utilizando los siguientes estadísticos de prueba: el error estándar promedio o raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), el error medio (MBE), llamado también sesgo o desviación y el coeficiente de correlación (R^2), calculados con el fin de caracterizar el ajuste de cada uno de los modelos con los datos medidos.

Explorador Solar, Control de Calidad y Validación

Esta fuente⁶ tiene como objetivo proporcionar una herramienta para el territorio chileno. Basándose en información de satélites que cubren regularmente el país y combinando esto con un modelo de los procesos en los que la radiación solar es modificada en su paso por la atmósfera, han desarrollado campos de alta resolución espacial y temporal de la radiación solar incidente [14]. En la Tabla 8 se presentan las características aplicadas de esta fuente para este estudio.

6 <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

Tabla 8. Configuración de la fuente: Explorador Solar.

PERIODO	2004-2016: 13 años
FRECUENCIA TEMPORAL	Hora
RESOLUCIÓN ESPACIAL	90 m
VARIABLES RELEVANTES	GHI, DNI y DHI
MODELO	Transferencia radiativa v2.1

A continuación, se muestran los gráficos de etiquetas de 2016, inicial y final que ejemplifican el CC y validación realizado a los 13 años que componen esta fuente.

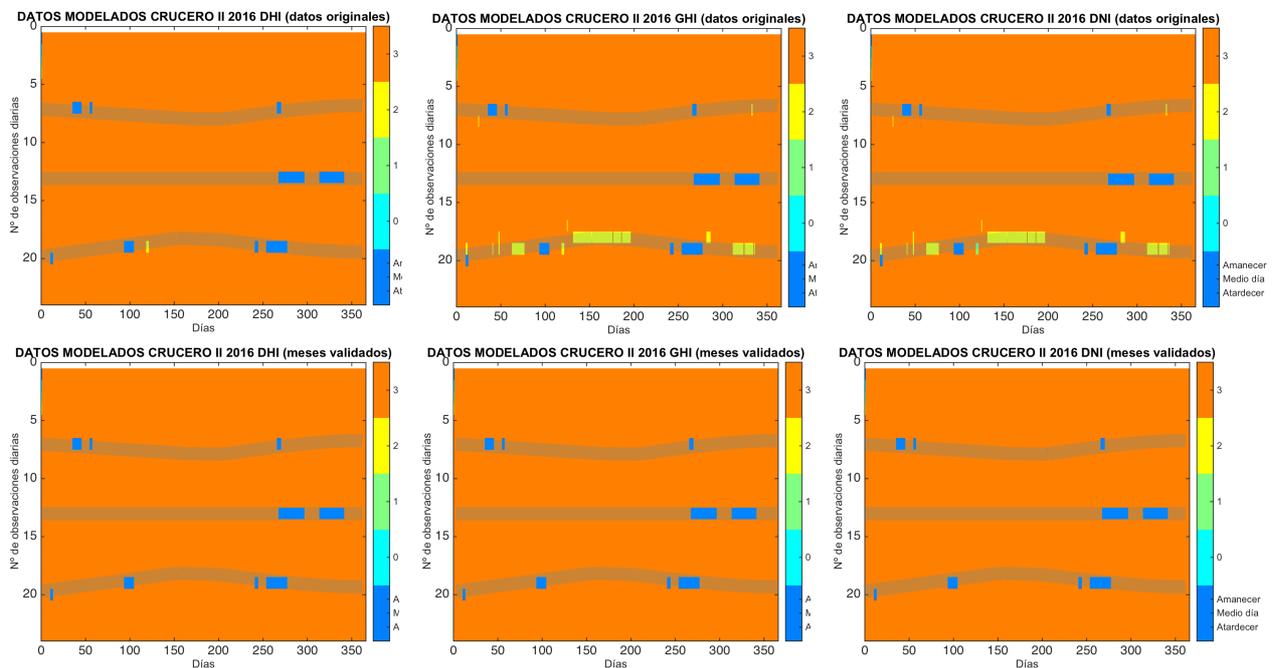


Figura 30. En fila superior: primer CC, en fila inferior: CC final a los datos de 2016 del Explorador Solar.

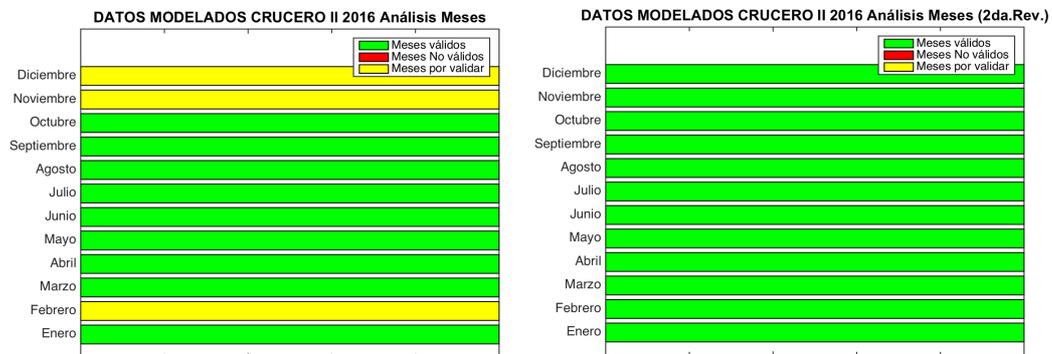


Figura 31. A la izquierda se identifican los meses por validar de 2016, a la derecha el resultado de la validación mensual.

Se observa en los gráficos de etiqueta de 2016 (Figura 30) que el número de observaciones diarias es 24, porque la frecuencia temporal de los datos es de 1hr. Por lo mismo, se admite sólo 1 dato no válido por día.

Para obtener más información acerca del modelo de estimación que es el Explorador Solar, los datos resultantes de los procesos de control de calidad y validación se han comparado con los registros de la campaña de medidas, obteniéndose los estadísticos que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Comparación entre el Explorador Solar y los datos medidos en Crucero II.

Estadístico	2013	2014	2015	2016
RMSE [W/m ²]	37,8	-	43,13	32,66
MBE [W/m ²]	-9,95	-	-9,93	-6,66
R ²	0,991	-	0,988	0,993

En general se puede decir que el Explorador Solar es buen estimador de los datos medidos por la estación Crucero II en cada año, con una pequeña tendencia a subestimar las estimaciones sobre las mediciones (MBE<0). La evaluación estadística del modelo de estimaciones del Explorador Solar con los años completos de la campaña de medidas, se ha realizado utilizando la media horaria de las mediciones. Una muestra de la alta correlación ($R^2 > 0,95$) entre las variables estimadas y medidas se observa en el siguiente gráfico de 2016.

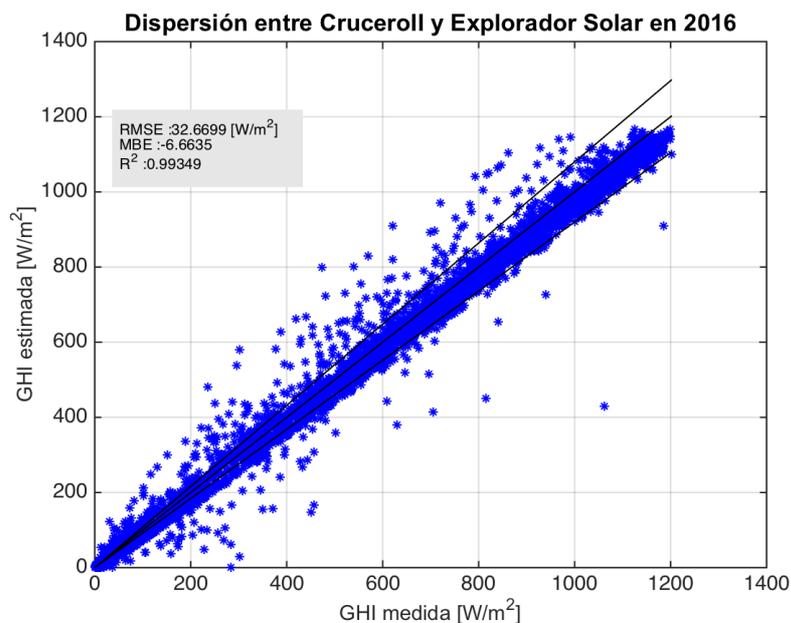


Figura 32. GHI estimada por el Explorador Solar versus GHI medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.

Meteonorm, Control de Calidad y Validación

Meteonorm⁷ es una base de datos climatológicos globales para aplicaciones de energía solar y ante todo, un método para el cálculo de la radiación solar en superficies arbitrariamente orientadas en cualquier ubicación deseada. Contiene numerosas bases de datos de todas partes del mundo y trabaja con una gran cantidad de modelos computacionales desarrollados en programas de investigación internacional. En la Tabla 10 se presentan las características aplicadas de esta fuente para este estudio.

Tabla 10. Configuración de la fuente: Meteonorm.

PERIODO	1991-2010: 20 años
FRECUENCIA TEMPORAL	10 min
RESOLUCIÓN ESPACIAL	8 km
VARIABLES RELEVANTES	GHI, DNI y DHI
MODELO	Minuto (Aguir & Collares-Pereira)

Los datos de radiación solar consultados, Meteonorm los entrega en una base de datos que consolida los 20 años en un registro anual, suministrando un año tipo en frecuencia temporal de 10 minutos. Esta información también ha pasado por un control de calidad cuyos resultados se visualizan en los gráficos siguientes.

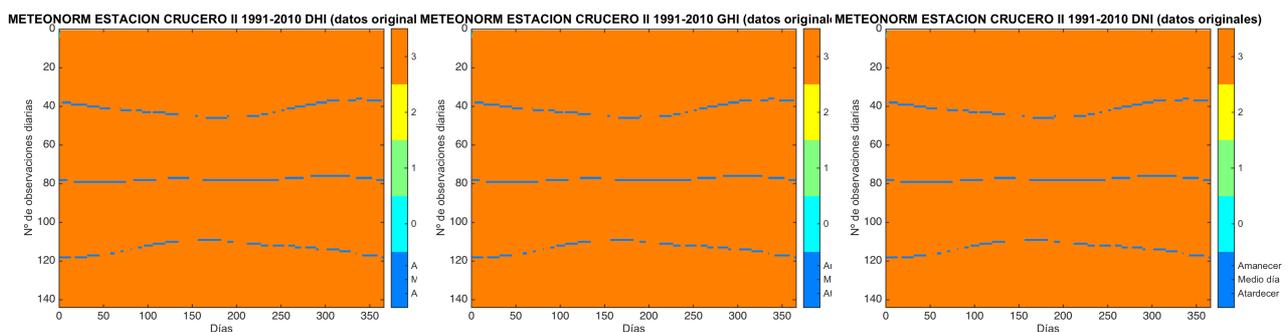


Figura 33. Primer CC a los datos originales del periodo 1991-2010 de Meteonorm.

Como se ve en la Figura 33, para los datos originales no fue necesario un segundo control de calidad, todos los datos cumplieron sin problemas las pruebas de la BSRN.

7 Version 7 (software versión 7.1.7 de Noviembre de 2015), www.meteonorm.com

Tabla 11. Comparación entre Meteonorm y los datos medidos en Crucero II.

Estadístico	2013	2014	2015	2016
RMSE [W/m ²]	114,02	-	113,84	115,33
MBE [W/m ²]	-38,19	-	-34,47	-41,33
R ²	0,926	-	0,923	0,928

La comparación entre el año tipo de Meteonorm y los años de medidas de Crucero II, se ha realizado utilizando la media horaria de los datos de cada base. Esta comparativa indica un buen ajuste de las estimaciones de Meteonorm a las mediciones, aunque es inferior en comparación con el Explorador Solar (RMSE_Meteo. > RMSE_Expl.), es decir, la variación de las estimaciones alrededor de las mediciones es mayor en Meteonorm. También, subestima las estimaciones sobre las mediciones. Estas diferencias se pueden observar, por ejemplo en 2016, en la mayor dispersión de los datos (Figura 34).

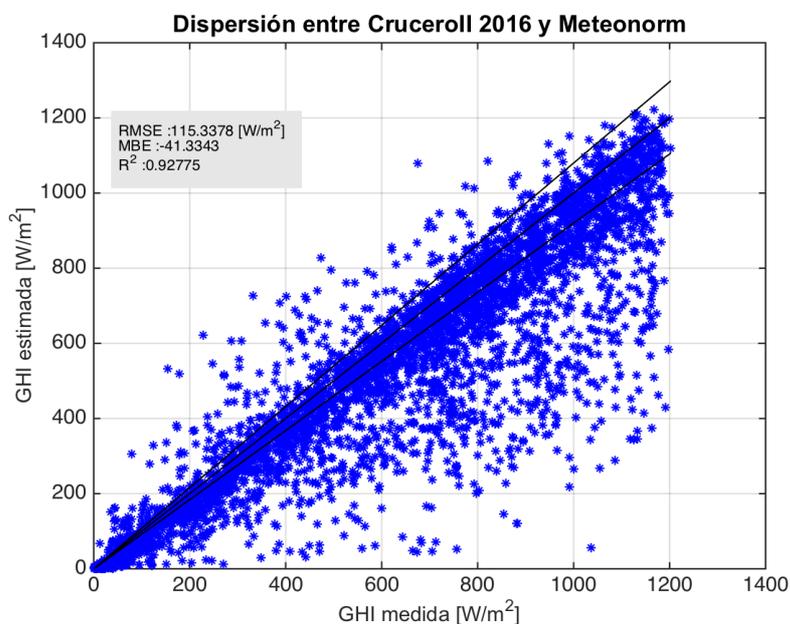


Figura 34. GHI estimada por Meteonorm (20 años) versus GHI medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.

NASA, Control de Calidad y Validación

La NASA⁸, a través de su programa de investigación en ciencias de la Tierra, ha apoyado durante mucho tiempo la investigación satelital que proporciona datos importantes para el estudio del clima y los procesos climáticos. Estos datos incluyen estimaciones a largo plazo de variables meteorológicas y de radiación solar. Estos productos basado en datos satelitales también han demostrado ser lo

8 <https://power.larc.nasa.gov/>

suficientemente precisos para proporcionar datos confiables de recursos solares y meteorológicos en regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes, y ofrecen dos características únicas: los datos son globales y, en general, continuos en el tiempo [17].

Tabla 12. Configuración de la fuente: NASA.

PERIODO	2007-2016: 10 años
FRECUENCIA TEMPORAL	Diaria
RESOLUCIÓN ESPACIAL	1° latitud x 1° longitud
VARIABLES RELEVANTES	Irradiación Global Horizontal
MODELO	Pinker & Laszlo

Dada la configuración de los datos aportados por la NASA (Tabla 12), en particular por la frecuencia diaria de los datos, sólo se ha realizado una validación mensual de cada año, siguiendo el procedimiento explicado en la sección 5.4.2.

Tabla 13. Comparación entre NASA y los datos medidos en Crucero II.

Estadístico	2013	2014	2015	2016
RMSE [kWh/m ² - día]	0,26	-	0,29	0,27
MBE [kWh/m ² - día]	-0,11	-	-0,07	-0,11
R ²	0,979	-	0,971	0,978

Las estimaciones de irradiación global horizontal diaria de la NASA interpretan correctamente las mediciones de la estación Crucero II (Tabla 13), a pesar de no contar con mayor frecuencia temporal, tienen un bajo error estándar (RMSE) cercano al 4% sobre el promedio de los registros de la campaña de medidas. También, al igual que todas las fuentes complementarias consultadas en esta sección, las estimaciones de la NASA tienen una alta correlación con las mediciones.

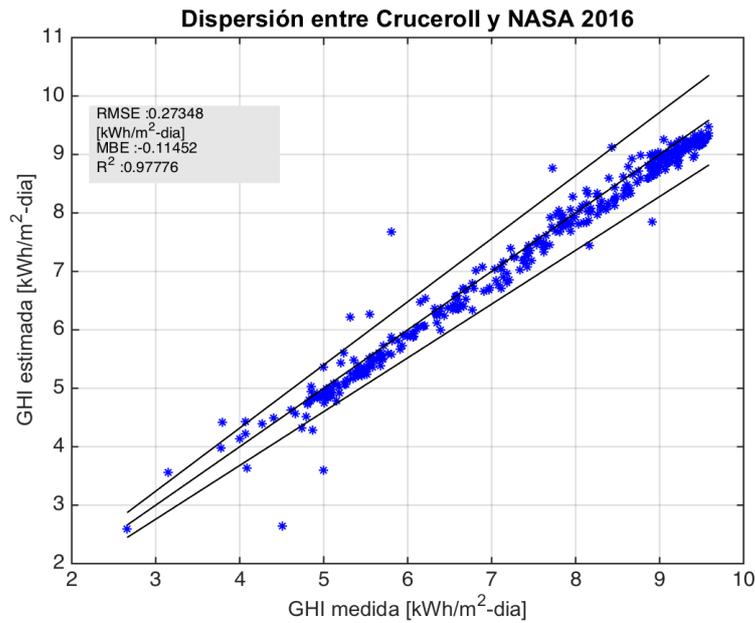


Figura 35. Irradiación global horizontal estimada por la NASA versus la medida en 2016. Las líneas externas representan una variación de +/- 8%.

Todo lo anterior confirma que estas fuentes de datos estimados complementarias son aptas para formar parte de los datos de entrada necesarios para determinar los valores mensuales representativos a largo plazo.

5.5.2 Tabla Maestra de Fuentes

La tabla maestra de fuentes reúne toda la información validada antes, de irradiación global, y se compone por dos tablas, una de entrada de datos medidos y estimados, y otra con los VMR resultantes.

Tabla de Entrada de VM

Esta tabla de entrada está dividida en dos partes, en una se consideran los datos medidos y en otra los estimados, de valores mensuales de irradiación global horizontal. Únicamente se incluyen años completos, por eso no se incluyen las mediciones de 2014 de la campaña de medidas, aunque sí se utilizarán más adelante en la generación del ASR. En caso de poder segregarse años completos, éstos serán preferentemente introducidos de forma individual en el tratamiento, para una mejor estimación de la variabilidad esperada.

Tabla 14. Valores mensuales de entrada de la campaña de medidas para determinar el VMR.

MEDICIONES			
ESTACIÓN CRUCERO II	CRUC_II_2013	CRUC_II_2015	CRUC_II_2016
T	1	1	1
C	1	1	1
D	10	10	10
P	0,10	0,10	0,10
Pn (0,6)	0,20	0,20	0,20
ENE	267	270	282
FEB	231	229	238
MAR	236	218	237
ABR	199	192	188
MAY	162	167	164
JUN	140	147	145
JUL	155	158	157
AGO	187	180	193
SEP	222	217	225
OCT	264	248	268
NOV	276	276	277
DIC	284	289	286
Irradiación Global Horizontal (kWh/m ² - año)	2624	2591	2660

Tabla 15. Valores mensuales de entrada por fuentes de estimaciones para determinar el VMR.

ESTIMACIONES												
ESTACIÓN CRUCERO II	ES_04	ES_05	ES_06	ES_07	ES_08	ES_09	ES_10	ES_11	ES_12	ES_13	ES_14	ES_15
T	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
D	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
P	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Pn (0,4)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
ENE	268	263	263	271	253	272	268	274	268	264	266	263
FEB	235	210	224	232	239	233	230	217	213	232	233	224
MAR	230	224	228	227	229	228	234	232	229	232	231	213
ABR	187	184	187	187	189	188	187	190	178	190	184	186
MAY	163	161	161	161	164	161	157	159	161	156	156	158
JUN	140	142	142	129	137	142	140	136	141	136	140	141
JUL	144	153	153	148	153	146	153	147	149	150	155	150
AGO	167	182	181	175	182	181	182	181	182	178	179	174
SEP	209	205	210	205	209	208	213	212	210	213	207	211
OCT	252	252	250	249	255	252	253	254	253	252	246	242
NOV	264	257	262	260	269	258	266	264	266	264	267	267
DIC	278	278	279	279	262	277	279	268	276	272	279	276
Irradiación Global Horizontal (kWh/m ² - año)	2538	2511	2542	2523	2540	2546	2560	2532	2525	2537	2543	2504

Tabla 16. Valores mensuales de entrada por fuentes de estimaciones para determinar el VMR.

ESTACIÓN CRUCERO II	ESTIMACIONES (cont.)											
	ES_16	METEO	NS_07	NS_08	NS_09	NS_10	NS_11	NS_12	NS_13	NS_14	NS_15	NS_16
T	1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
D	10	10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
P	0,05	0,50	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Pn (0,4)	0,02	0,17	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
ENE	277	237	267	242	254	256	257	253	264	270	264	259
FEB	237	202	237	224	217	216	204	211	231	240	226	240
MAR	236	197	228	214	213	219	219	216	234	236	219	236
ABR	186	164	179	175	175	172	178	167	193	189	192	187
MAY	162	143	152	152	150	146	147	152	160	161	166	162
JUN	143	125	124	127	131	130	125	132	140	145	144	143
JUL	152	136	132	142	137	145	136	141	153	157	157	152
AGO	188	154	159	170	171	171	171	170	182	183	179	187
SEP	215	194	189	199	200	200	201	196	215	211	217	219
OCT	258	238	229	236	240	239	239	239	259	250	249	260
NOV	266	247	236	248	243	251	249	249	272	271	271	270
DIC	280	254	260	257	260	263	257	260	279	282	281	283
Irradiación Global Horizontal (kWh/m ² - año)	2601	2289	2391	2386	2391	2409	2384	2387	2583	2593	2565	2597

ES_xx: Explorador Solar año 20xx, METEO: Meteonorm, NS_xx: NASA año 20xx

Cada año de cada fuente tiene un peso relativo (P) que está definido en la Norma por la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{T_i}{C_i * D_i} \quad (3)$$

Donde,

i : cada año (o período de años) de cada una de las fuentes.

T_i : Indicador de tiempo. Toma valores enteros de 1 a 10 como máximo (valores menores no permitidos, valores mayores se truncarían a 10), siendo el valor del periodo de tiempo de la fuente expresado en años o lo que es lo mismo, el número de años del que proviene o al que representa, por ejemplo, la fuente Meteonorm representa 20 años de estimaciones que se truncan a 10.

D_i : indicador de la distancia. Toma valores enteros de 10 a 100 como máximo (valores menores se truncarían a 10, valores mayores no permitidos). Se trata de un valor de distancia o de resolución dependiendo que se trate de una fuente de medida o de una fuente de estimación. En el caso de medidas, se le asigna el valor de la distancia entre la

ubicación de la fuente y el emplazamiento a evaluar. En el caso de estimaciones se le asigna el valor de la resolución espacial de la estimación. No se pueden por tanto incluir datos de estaciones de medida correspondientes a distancias superiores a 100 km, ni de bases de datos que suministren una estimación sobre superficies de tamaño superior a 10.000 km² (o 1°). Las estimaciones de NASA se encontrarían en el límite superior, por tanto, se les asigna un valor de 100. En el límite inferior, las del Explorador Solar, se les asigna el mínimo valor de 10.

C_i : indicador de la naturaleza de los datos. Toma valores 1, 2 o 3. Se le asigna el valor 1 en el caso de ser una fuente de datos con medidas directas o indirectas en el emplazamiento. Se le asigna valor 2 en el caso de que la fuente suministre datos de estimaciones, años tipo o medidas conocidas y validadas. Se le asigna valor 3 en el caso de estimaciones de años tipo o representativos de un largo periodo de fuentes no contrastadas (como los provenientes de artículos científicos o información a la que no se tiene acceso directo).

Los pesos relativos (P_i) se deben normalizar a una suma igual a 1, quedando así transformados en pesos normalizados (P_n) [Ec. 4] que de ser posible, a las mediciones se les asignará un valor de normalización de 0,6 y a las estimaciones un 0,4.

$$P_{in} = \frac{P_i * V_n}{\sum P_i} \quad \text{donde, } V_n \text{ es el valor de normalización.} \quad (4)$$

Tabla de Salida del VMR

Con los datos de las tablas de entrada anteriores, es decir, con los valores mensuales de cada año de cada fuente, se calculan los valores mensuales representativos de cada mes, mediante la siguiente ecuación:

$$VMR_j = \sum P_{in} * VM_{ji} \quad (5)$$

Donde,

j : es cada mes del año.

VM_{ji} : es el valor mensual del mes j de cada año de cada una de las fuentes.

Tabla 17. Valores mensuales representativos a largo plazo (VMR) para el emplazamiento Crucero II.

ESTACIÓN CRUCERO II	VMR	Desviación típica ponderada	99,7% probabilidad	
			Min.	Max.
ENE	265	14,6	222	309
FEB	226	12,4	189	264
MAR	224	14,5	181	268
ABR	187	11,5	152	221
MAY	160	8,3	135	184
JUN	140	8,0	116	163
JUL	152	8,5	126	178
AGO	179	13,0	140	218
SEP	214	12,0	178	250
OCT	254	11,9	219	290
NOV	268	13,0	229	307
DIC	278	13,3	238	318
Irradiación Global Horizontal (kWh/m ² - año)	2548	129,5	2159 (Min.)	2936 (Max.)

Se complementa la información de la Tabla 17, con la desviación típica ponderada y un valor máximo y mínimo de +/- tres sigmas, que implica una confianza del 99,7% de probabilidad de que los valores mensuales de irradiación global horizontal, normalmente estén dentro de ese rango.

5.6 Generación de la Serie Representativa

Siguiendo la opción 1, de las metodologías definidas por la Norma para la determinación del VMR (ver sección 3.3.3), en particular, la que utiliza varias fuentes complementarias de estimaciones de GHI, se han calculado los valores mensuales representativos para el emplazamiento en estudio. Dichos VMR servirán como referencia para generar la serie representativa. Para la generación del ASR se requiere la selección de 12 meses, provenientes cada uno de la campaña de medidas.

5.6.1 Procedimiento Basado en la Campaña de Medidas

Este procedimiento consiste en comparar los valores mensuales de la campaña de medidas con los VMR, seleccionando aquellos con la menor diferencia y que cumplen con la ecuación 2, definida en la sección 3.3.4. Aplicando este procedimiento a los valores obtenidos en la sección anterior, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 18: Meses de la campaña de medidas elegidos, para formar parte del ASR.

	VMR - VM I				(1)	(2)	MES/AÑO ELEGIDO
	CRUC_II_2013	CRUC_II_2014	CRUC_II_2015	CRUC_II_2016			
ENE	1,79	4,20	4,92	16,50	1,79	SI	ENE 2013
FEB	4,89	16,43	2,63	11,81	2,63	SI	FEB 2015
MAR	11,99	13,90	6,32	12,70	6,32	NO	-
ABR	12,26	4,37	5,86	1,29	1,29	SI	ABR 2016
MAY	2,13	5,28	7,77	4,06	2,13	SI	MAY 2013
JUN	0,69	7,18	7,49	5,13	0,69	SI	JUN 2013
JUL	3,40	11,43	6,44	5,50	3,40	SI	JUL 2013
AGO	7,95	8,0	0,31	13,45	0,31	SI	AGO 2015
SEP	8,0	213,95	2,57	11,43	2,57	SI	SEP 2015
OCT	9,82	254,11	6,24	13,60	6,24	NO	-
NOV	7,47	7,91	7,48	8,73	7,47	NO	-
DIC	5,77	12,41	10,72	7,60	5,77	NO	-

(2): $(2\% \cdot \text{VAR}) / 12 = 4,25$

Los meses elegidos, pasan a formar parte del ASR, aquellos meses que no cumplen con la ecuación 2, mediante un método de sustitución diaria, se ajustan para cumplir con dicha condición.

5.6.2 Método de Sustituciones

Utilizando el procedimiento descrito en la sección 3.3.4, que recomienda sustituir un día por otro día con idéntica fecha pero de otro año. Se han realizado estos cambios a los meses de marzo, octubre, noviembre y diciembre, intentando hacer la menor cantidad de reemplazos y a su vez cumpliendo la condición expresada en la Tabla 18 columna 7. Es recomendable comenzar este procedimiento con los meses cuyas diferencias con el VMR sea la menor.

Con programación es posible encontrar estas combinaciones de días que nos acercan al valor objetivo VMR. En la Figura 36 se muestra el procedimiento para sustituir días de marzo de 2015 por días de marzo de 2013, de la campaña de medidas.

AÑO	MES	DIA	GHI	AÑO	MES	DIA	GHI	RESULTADOS CON UNA SOLUCIÓN DE DÍAS A SUSTITUIR			AÑO	MES	DIA	GHI		
2015	3	1	8,2	2013	3	1	7,6	(1).	(2).	(2) - (1)	2013	3	1	7,6		
2015	3	2	8,2	2013	3	2	7,9	2015 3 1	8,2	2013 3 1	7,6	-0,6	2015	3	2	8,2
2015	3	3	8,2	2013	3	3	7,8	2015 3 13	7,6	2013 3 13	8,0	0,4	2015	3	3	8,2
2015	3	4	8,0	2013	3	4	8,0	2015 3 17	7,4	2013 3 17	7,9	0,5	2015	3	4	8,0
2015	3	5	7,9	2013	3	5	7,9	2015 3 20	7,1	2013 3 20	7,5	0,4	2015	3	5	7,9
2015	3	6	7,9	2013	3	6	8,1	2015 3 21	6,1	2013 3 21	7,4	1,3	2015	3	6	7,9
2015	3	7	7,8	2013	3	7	7,8	2015 3 24	3,0	2013 3 24	7,4	4,4	2015	3	7	7,8
2015	3	8	7,7	2013	3	8	6,1	2015 3 30	7,3	2013 3 30	7,4	0,1	2015	3	8	7,7
2015	3	9	7,7	2013	3	9	7,7					6,5	2015	3	9	7,7
2015	3	10	7,6	2013	3	10	8,0						2015	3	10	7,6
2015	3	11	7,7	2013	3	11	8,1						2015	3	11	7,7
2015	3	12	7,8	2013	3	12	7,7						2015	3	12	7,8
2015	3	13	7,6	2013	3	13	8,0						2013	3	13	8,0
2015	3	14	7,0	2013	3	14	8,0						2015	3	14	7,0
2015	3	15	7,5	2013	3	15	7,9						2015	3	15	7,5
2015	3	16	6,9	2013	3	16	7,7						2015	3	16	6,9
2015	3	17	7,4	2013	3	17	7,9						2013	3	17	7,9
2015	3	18	6,8	2013	3	18	7,7						2015	3	18	6,8
2015	3	19	6,6	2013	3	19	7,6						2015	3	19	6,6
2015	3	20	7,1	2013	3	20	7,5						2013	3	20	7,5
2015	3	21	6,1	2013	3	21	7,4						2013	3	21	7,4
2015	3	22	5,6	2013	3	22	7,4						2015	3	22	5,6
2015	3	23	6,3	2013	3	23	7,4						2015	3	23	6,3
2015	3	24	3,0	2013	3	24	7,4						2013	3	24	7,4
2015	3	25	3,1	2013	3	25	7,3						2015	3	25	3,1
2015	3	26	5,5	2013	3	26	7,3						2015	3	26	5,5
2015	3	27	7,1	2013	3	27	7,3						2015	3	27	7,1
2015	3	28	7,4	2013	3	28	7,4						2015	3	28	7,4
2015	3	29	7,5	2013	3	29	7,5						2015	3	29	7,5
2015	3	30	7,3	2013	3	30	7,4						2013	3	30	7,4
2015	3	31	7,3	2013	3	31	7,4						2015	3	31	7,3
VM_2015 = 217,8				VM_2013 = 236,2				VMR = 224,3			VM_FINAL = 224,3					
								Distancia al VMR (VMR - VM_2015) = 6,5								

Figura 36. Sustitución de días de marzo de 2015 por días de marzo de 2013.

El resultado de la Figura 36, es una de las posibles soluciones que puede haber al combinar días de 2013 en 2015, en este caso, la solución proporciona un valor mensual final igual al VMR objetivo, ya que $MÍN | VMR - VM_FINAL | = 0,0 < 4,25$, lo que cumpliría la condición de la Tabla 18 columna 7. El procedimiento se repite para los meses de octubre, noviembre y diciembre, hasta conseguir los meses definitivos que formarán el Año Solar Representativo del emplazamiento.

Tabla 19. Meses de la campaña de medidas definitivos que componen el ASR.

	VMR - VM				(1)	(2) $\frac{2\% \cdot VAR}{12} = 4,25$ 12	(1) < (2)	MES/AÑO ELEGIDO
	CRUC_II_2013	CRUC_II_2014	CRUC_II_2015	CRUC_II_2016				
ENE	1,79	4,20	4,92	16,50	1,79	SI	ENE 2013	
FEB	4,89	16,43	2,63	11,81	2,63	SI	FEB 2015	
MAR	11,99	13,90	0,0	12,70	0,0	SI	MAR 2015+2013	
ABR	12,26	4,37	5,86	1,29	1,29	SI	ABR 2016	
MAY	2,13	5,28	7,77	4,06	2,13	SI	MAY 2013	
JUN	0,69	7,18	7,49	5,13	0,69	SI	JUN 2013	
JUL	3,40	11,43	6,44	5,50	3,40	SI	JUL 2013	
AGO	7,95	8,0	0,31	13,45	0,31	SI	AGO 2015	
SEP	8,0	213,95	2,57	11,43	2,57	SI	SEP 2015	
OCT	9,82	254,11	0,0	13,60	0,0	SI	OCT 2015+2013	
NOV	3,6	7,91	7,48	8,73	3,6	SI	NOV 2013+2014	
DIC	0,5	12,41	10,72	7,60	0,5	SI	DIC 2013+2015	

En los meses con dos años, el primero corresponde al año base y el segundo es el origen de días sustitutos.

Finalmente, con todos los procedimientos previstos en la Norma y desarrollados hasta aquí, se elabora el siguiente informe.

5.6.3 Informe de Salida del ASR

IDENTIFICACIÓN	<i>Identificación del autor.</i>	Universidad de Sevilla, Luarte C. Gonzalo, Moreno T. Sara, Silva P. Manuel	
	<i>Fecha de realización.</i>	Noviembre de 2017	
	<i>Descripción genérica del emplazamiento.</i>	Comuna de María Elena, II Región de Antofagasta, Chile.	
INTRODUCCIÓN	<i>Frecuencia temporal.</i>	10 minutal	
	<i>Variables que incluye el ASR.</i>	DNI, GHI, DHI, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento a 6m y 12m y dirección del viento.	
CAMPAÑA DE MEDIDAS	<i>Características de la estación de medidas.</i>	<i>Ubicación geográfica:</i>	Latitud: 22.27 °S, longitud: 69.57 °O.
		<i>Datos técnicos de la estación:</i>	(1) Pirheliómetro y (2) piranómetros montados en sistema automático de rastreo solar y sombreado, (1) termómetro, (1) higrómetro, (2) anemómetros y (1) veleta.
		<i>Certificados de calibración de los sensores:</i>	Ver Anexo D.
	<i>Control de calidad, descripción y resultados.</i>	Se aplicó el control de calidad recomendado por la BSRN, descrito en el Anexo A, a todas las mediciones y estimaciones, los resultados se visualizan en gráficos de etiquetas.	
	<i>Validación, descripción y resultados.</i>	Se aplicaron criterios basados en la metodología de la BSRN para validar los datos, obteniéndose las bases de datos con años completos validados para el estudio del VMR.	
ESTUDIO DEL VALOR REPRESENTATIVO A LARGO PLAZO	<i>Metodología empleada.</i>	Se emplea la metodología que utiliza varias fuentes de información.	
	<i>Fuentes de información.</i>	Fuentes de medidas: datos obtenidos desde la estación meteorológica Crucero II. Fuentes de estimaciones: Explorador Solar, Meteonorm y NASA.	
	<i>Resultados.</i>	Ver Tabla 17.	
GENERACIÓN DE LA SERIE REPRESENTATIVA	<i>Metodología empleada.</i>	Se emplea el procedimiento basado en la campaña de medidas.	
	<i>Resultados.</i>	Ver Tabla 19.	
RESUMEN DE LOS VALORES MENSUALES	<i>Valores mensuales de la campaña de medidas.</i>	Ver Tabla 14.	
	<i>Valores mensuales del VMR.</i>	Ver Tabla 17.	
	<i>Valores mensuales del ASR en todas las variables.</i>	Ver Tabla 20.	

6 Análisis de Resultados

A partir de los resultados de la Tabla 19, se genera el ASR que tendrá la misma frecuencia temporal que los datos de la campaña de medidas. En la tabla siguiente se presenta un resumen de valores mensuales del ASR, para las variables analizadas en este trabajo.

Tabla 20. Valores mensuales ASR.

AÑO	MES	Irradiación Global Horizontal				Irradiación Directa Normal				Irradiación Difusa Horizontal			
		(1)	(2)			(1)	(2)			(1)	(2)		
		Mensual	Media	Mín.	Máx.	Mensual	Media	Mín.	Máx.	Mensual	Media	Mín.	Máx.
2013	1	267	8,6	6,0	9,6	284	9,2	2,1	12,6	62	2,0	0,8	4,4
2015	2	229	8,2	6,9	8,8	250	8,9	5,0	11,0	44	1,6	0,9	3,2
2015+2013	3	224	7,2	3,1	8,2	267	8,6	1,1	11,0	40	1,3	0,6	2,8
2016	4	188	6,3	5,0	6,9	257	8,6	4,4	10,0	30	1,0	0,5	2,9
2013	5	162	5,2	1,5	6,0	245	7,9	0,2	9,6	27	0,9	0,5	1,9
2013	6	140	4,7	2,2	5,3	226	7,5	0,2	9,5	25	0,8	0,4	2,5
2013	7	155	5,0	2,7	5,5	251	8,1	1,5	9,6	22	0,7	0,4	2,4
2015	8	180	5,8	2,0	6,6	263	8,5	0,9	10,3	27	0,9	0,5	3,3
2015	9	217	7,2	6,4	7,9	309	10,3	8,6	11,0	22	0,7	0,6	1,0
2015+2013	10	254	8,2	5,9	9,0	319	10,3	4,3	11,9	32	1,0	0,6	2,5
2013+2014	11	272	9,1	8,4	9,4	328	10,9	8,4	12,4	35	1,2	0,7	2,4
2013+2015	12	278	9,0	6,8	9,5	318	10,3	3,4	12,0	47	1,5	0,9	4,3
Total anual (kWh/m ² – año)		2566				3318				414			

(1) en kWh/m² – mes. (2) en kWh/m² – día.

En la Figura 37 se representan los valores mensuales de irradiación global horizontal del ASR junto a las principales fuentes de estimación.

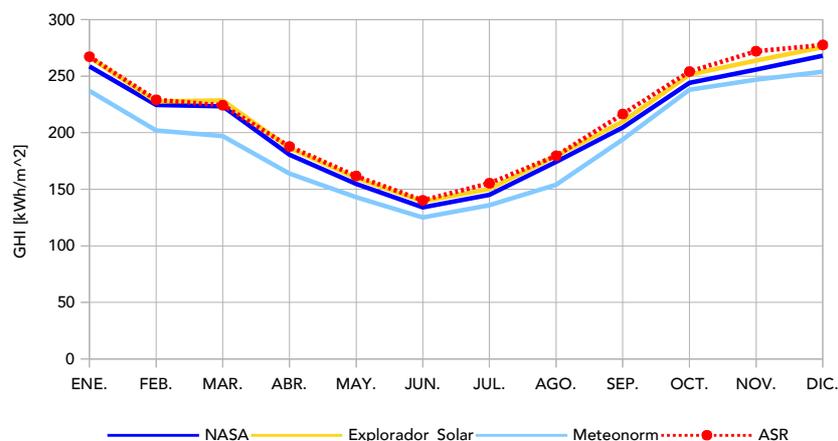


Figura 37. Comparativa entre las principales fuentes de estimación de irradiación global horizontal y el ASR. (Los valores para NASA y Explorador Solar, corresponden a la media del período que cubre cada fuente).

Observando los valores mensuales de irradiación, en el gráfico anterior, se distingue la curva de Meteonorm por subestimar los valores mensuales con respecto al resto de fuentes. Esto puede deberse a dos factores, el primero, debido al largo período de tiempo que representa Meteonorm (20 años), y el segundo, al método como calcula Meteonorm los datos de GHI, mediante la interpolación de 3 estaciones: Calama/El Loa (73 km y $\Delta+1000$ m), Antofagasta (157 km y $\Delta-1000$ m) y Arica-Chacalluta (446 km y $\Delta+1000$ m) [En paréntesis la distancia y la diferencia en altitud aproximadas, respecto al emplazamiento]. Explorador Solar y NASA, tienen con respecto al ASR, una variación porcentual en el valor anual, inferior al 4%.

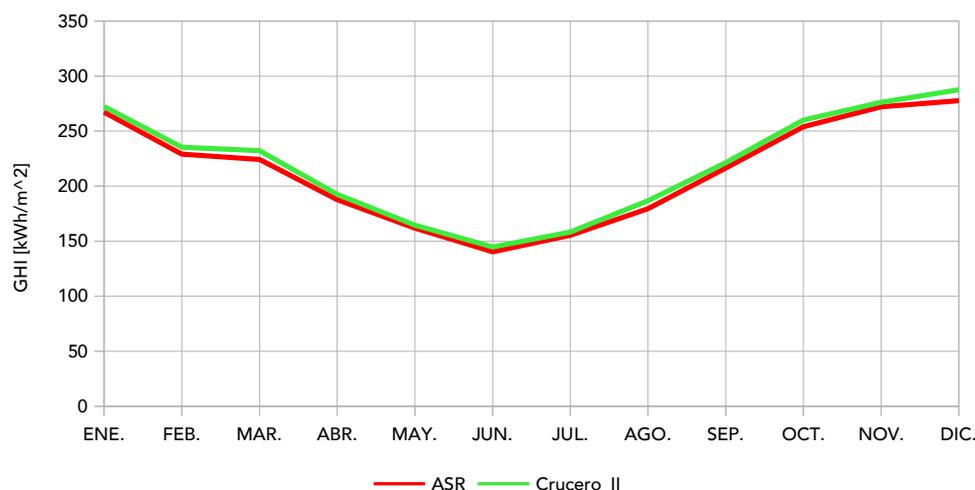


Figura 38. Comparativa entre los datos medidos de irradiación global horizontal en Crucero II y su ASR. (Los valores de Crucero_II, corresponden a la media de los años con mediciones).

Con una diferencia del 2,5% anual, las mediciones de irradiación en la estación Crucero II son levemente superiores a las obtenidas para el ASR del emplazamiento, como se ve en la Figura 38.

Debido a que los datos estimados de NASA no aportan la DNI, se incluyen los valores de un TMY que entrega el programa SAM (System Advisor Model)⁹ para la localidad más cercana, la ciudad de Antofagasta. Se observa nuevamente, que tanto Meteonorm y SAM subestiman las condiciones de radiación directa, probablemente al no contar con estaciones más próximas al emplazamiento Crucero II. En esta variable, el ASR está por debajo un 7% anual, del modelo Explorador Solar (Figura 39).

9 <https://sam.nrel.gov/>

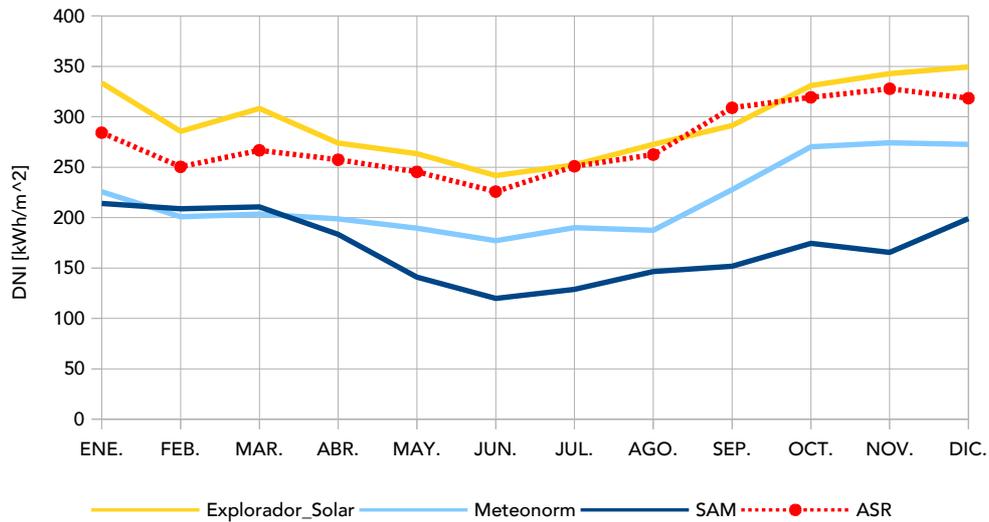


Figura 39. Comparativa entre las principales fuentes de estimación de irradiación directa normal y el ASR. (Los valores del Explorador Solar, corresponden a la media del período que cubre esa fuente).

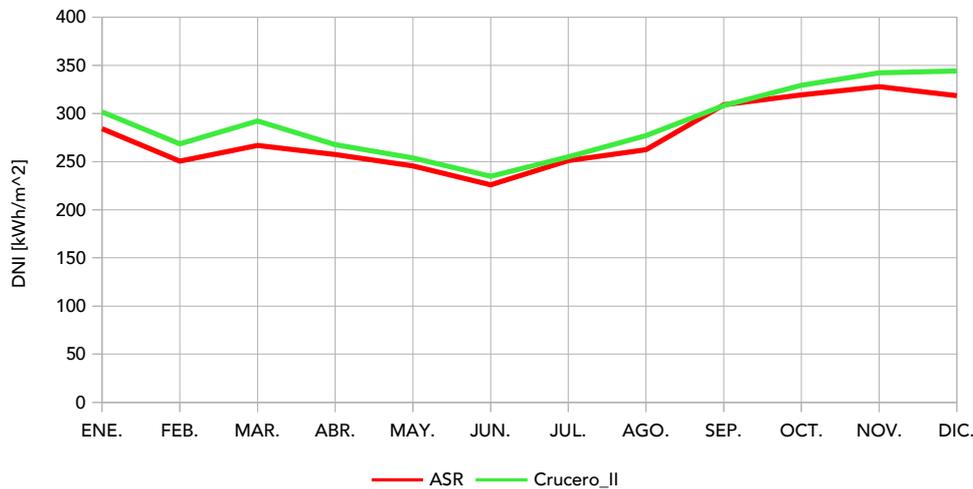


Figura 40. Comparativa entre los datos medidos de irradiación directa normal en Crucero II y su ASR. (Los valores de Crucero II, corresponden a la media de los años con mediciones).

En el gráfico de la Figura 40, se puede observar como afecta el fenómeno conocido como “invierno boliviano” a la DNI, ya que aún cuando enero y febrero son meses de verano, la incursión de nubes desde el altiplano boliviano, provoca descensos en la radiación directa, similares a meses de invierno. Esto es detectado con mayor notoriedad por las mediciones de horas de sol, registradas en una localidad cercana a Crucero II (Figura 41).

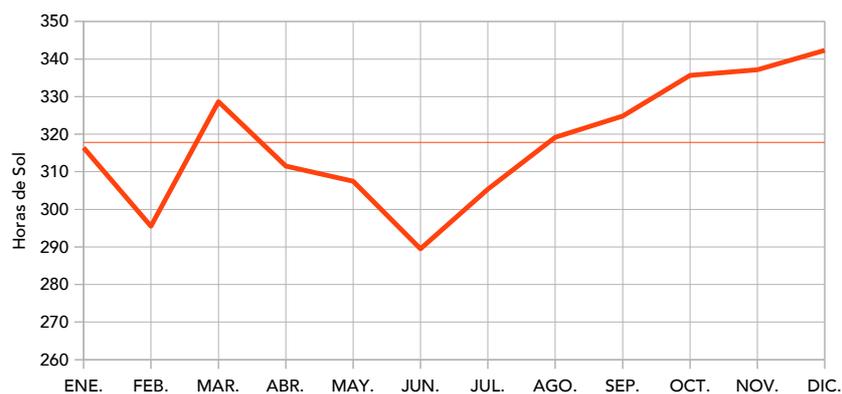


Figura 41. Horas de sol, promedio años 2013, 2014, 2015 y 2016 en Calama. (Instrumento de medición: Heliógrafo Campbell Stokes). Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Por último, con una diferencia del 4,5% anual, las mediciones de DNI en la estación Crucero II son superiores a las obtenidas para el ASR del emplazamiento.

7 Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo, se ha observado la importancia de algunos factores previos a la aplicación de esta Normativa. Factores como la calidad de los instrumentos de medición, la O&M y la configuración de la estación, para la medición de la componente directa de la radiación. Esto ha permitido por ejemplo, conocer la causa de la ausencia de mediciones de DNI en los meses de septiembre y octubre de 2014. Por otra parte, la configuración de la estación, ha permitido aplicar íntegramente la metodología de la BSRN, al contar con las mediciones de GHI y la posibilidad de calcular la GHI a partir de sus componentes (DNI y DHI), para el control de calidad requerido en la Norma. Sin duda estos factores propiciaron los buenos resultados del primer control de calidad (CC1), donde los datos no aptos correspondieron en 2013 a menos del 0,008%, 2014: 8,53%, 2015: 2% y 2016: 0,36% de las mediciones de DNI.

El etiquetado resultante de aplicar los procedimientos de CC que propone la BSRN para evaluar los datos, implementado en una herramienta gráfica [13], fue fundamental en la detección visual de los datos no aptos, tanto para las mediciones como para las estimaciones, mostrando su adaptabilidad a datos en distintas frecuencias temporales superiores a una hora. Pero la utilidad de esta herramienta de CC visual, se extiende más allá de la mera visualización de los datos anómalos. Con sus resultados, es decir, con los archivos de datos generados, es posible identificar, separar y utilizar los criterios de corrección en aquellos datos, para luego aplicarles los procedimientos de validación diaria y mensual, tal como se definen en la normativa.

Con respecto a las correcciones realizadas a los datos no aptos, en primer lugar se modificaron algunas restricciones de las ecuaciones de la BSRN, debido a que se observaron datos que estaban quedando etiquetados como no aptos, producto del intervalo de registro y las condiciones de soleamiento del emplazamiento hacia el atardecer. En segundo lugar, estas mismas ecuaciones se modificaron, lo que mostró ser una mejor aproximación, que la media por ejemplo, cuando se necesitó corregir datos que no cumplían con la tercera prueba. Sin embargo, no se puede asumir que estos criterios de corrección, funcionarán en otros estudios, donde quizás una interpolación pueda dar mejores resultados.

Con respecto a las fuentes de datos estimados complementarias, se recomienda tener especial cuidado con el modelo aplicado para generar la estimación, ya que aún cuando Meteonorm tiene mayor resolución (8 km) que la NASA (1°), los datos de la NASA muestran ser más representativos de las condiciones del emplazamiento, en la variable de irradiación global horizontal del ASR (Figura 37). Por otro lado, Meteonorm tiene mayor peso, en el conjunto de estimaciones que la NASA, por la cantidad de años que abarca y por su mayor resolución. Por tanto, es conveniente cuidar qué bases de datos se eligen, porque podrían llevar a sub o sobrestimar los valores mensuales.

La campaña de medidas junto con las fuentes de datos estimados, permitió determinar los valores mensuales representativos (VMR) del comportamiento a largo plazo, del recurso solar en el emplazamiento estudiado. Para conseguir este objetivo, es recomendable contar con más de 1 año de mediciones, ya que tanto la validación mensual como el método de sustituciones, aplicado en la generación del ASR, se favorecen de esto.

En conclusión, con una campaña de medidas, basada en 4 años de observaciones, complementada con fuentes de datos estimados, que en su conjunto suman 24 años, ha sido posible aplicar los procedimientos que establece la Norma UNE 206011, consiguiendo generar un Año Solar Representativo para el emplazamiento de la estación meteorológica terrestre Crucero II.

8 Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización (AENOR), *Energía solar. Vocabulario.*, UNE-EN ISO 9488:2001.
- [2] Long, C.N.; Dutton, E.G., *Baseline Surface Radiation Network: Global Network Recommended QC Tests—V2.0.*, Consultado el 1 de febrero de 2017, http://bsrn.awi.de/fileadmin/user_upload/bsrn.awi.de/Publications/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf, 2002.
- [3] M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, C. Gueymard, D. Myers, S. Wilcox, P. Blanc, and R. Perez., *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications.*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report NREL/TP-5D00-63112, 2015.
- [4] Ruiz H, Valeriano; Silva P, Manuel A., *Radiación Solar: Medidas y cálculos (Apuntes de la asignatura Energías Renovables).*, Grupo de Termodinámica y Energías Renovables, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [5] Tshewang, L., Samten, L., *Comparison of methodologies for generating a typical meteorological year (TMY).*, Energy for Sustainable Development, Volumen XI No.3, Sep., 2007.
- [6] Santos, J.M., Pinazo, J.M., y Canada, J., *Methodology for generating daily clearness index values K-t starting from the monthly average daily value K-t. Determining the daily sequence using stochastic models.*, Renewable Energy (28), p. 1523-44, 2003.
- [7] Lund, H., *Design Reference Years. Task 9, Solar Heating and Cooling.*, International Energy Agency, , 1995.
- [8] Pagh Nielsen K., Blanc P., Vignola F., Ramírez L., Blanco M., Meyer R., *Discussion of currently used practices for: Creation of Meteorological Data Sets for CSP/STE Performance Simulations.*, , SolarPACES, Abr. 2017.
- [9] Asociación Española de Normalización (AENOR), *Centrales termosolares. Terminología (Versión corregida, 2013-09-04)*, UNE 206009:2013.
- [10] Myers, Daryl R., (2017), *Solar Radiation*, CRC Press.
- [11] Maxwell, E.; Wilcox, S.; Rymes, M., *Users Manual for SERI QC Software: Assessing the Quality of Solar Radiation Data.*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report NREL/TP-463-5608 DE93018210., 1993.

- [12] The MathWorks, Inc., MATLAB [Software], R2014b (8.4.0), Natick, Massachusetts, United States.
- [13] Moreno-Tejera, S.; Ramírez-Santigosa, L.; Silva-Pérez, M.A., *A proposed methodology for quick assessment of timestamp and quality control results of solar radiation data.*, *Renewable Energy* (78), p. 531-537, 2015.
- [14] Molina M., Alejandra, *Modelo de Radiación Solar (Explorador de Energía Solar)*, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y Ministerio de Energía de Chile, , 2017.
- [15] Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), *Informe de Instalación de la Estación de Medición Solar Crucero II*, Ministerio de Energía de Chile, , 2013.
- [16] Gert König-Langlo, Rainer Sieger, Holger Schmithusen, Amelie Beyer, Friedrich Richter, and Ellsworth. G. Dutton, *Update of the Technical Plan for BSRN Data Management.*, World Meteorological Organization (WMO), WCRP Report – 24, 2013.
- [17] Paul W. Stackhouse, David Westberg, William S. Chandler, Taiping Zhang, James M. Hoell, *Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER), Agroclimatology Methodology*, NASA & SSAI (Langley Research Center), , May. 2017.

9 Bibliografía

- Asociación Española de Normalización (AENOR), *Centrales termosolares. Procedimiento de generación de Año Solar Representativo*, UNE 206011:2014.
- Muhammad, I., *An Introduction to Solar Radiation*, The University of British Columbia, Canada, 1983.
- Gonzalo Abal, *Fundamentos de Energía Solar versión 2.31*, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República de Uruguay.
- Cruz Silva C., Calderón Suenzen J., *Guía Climática Práctica de Chile*, Dirección Meteorológica de Chile, Nov. 2008.
- Hoyer-Klick, C., Hustig, F., Schwandt, M., Meyer, R., *Characteristic meteorological years from ground and satellite data*, SolarPACES Symp., Berlin, Germany, Sep. 2009.
- Dirección Meteorológica de Chile, *Anuarios Climatológicos*, Santiago, 2013-2016.
- ISO/DIS 9060 Solar energy, *Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*.
- Pierre Ineichen, *Five satellite products deriving beam and global irradiance validation on data from 23 ground stations.*, University of Geneva, Feb. 2011.

10 Anexos

Anexo A

Metodología de la BSRN

Estas tres pruebas consisten en establecer:

- I. Los límites físicamente posibles, hasta donde pueden llegar las variables de irradiancia.
- II. Los límites extremadamente raros.
- III. Comparaciones o congruencias entre variables.

La primera prueba está definida por las siguientes expresiones:

$$-4 [W/m^2] < GHI < I_{CS} * \varepsilon_0 * 1.5 * (\cos(\theta_z))^{1.2} + 100 [W/m^2] \quad (6)$$

$$-4 [W/m^2] < DHI < I_{CS} * \varepsilon_0 * 0.95 * (\cos(\theta_z))^{1.2} + 50 [W/m^2] \quad (7)$$

$$-4 [W/m^2] < DNI < I_{CS} * \varepsilon_0 \quad (8)$$

La segunda prueba está definida para $\cos(\theta_z) \leq 90^\circ$, cuando $\cos(\theta_z) \geq 90^\circ$ se usa $\cos(\theta_z) \neq 0$.

$$-2 [W/m^2] < GHI < I_{CS} * \varepsilon_0 * 1.2 * (\cos(\theta_z))^{1.2} + 50 [W/m^2] \quad (9)$$

$$-2 [W/m^2] < DHI < I_{CS} * \varepsilon_0 * 0.75 * (\cos(\theta_z))^{1.2} + 30 [W/m^2] \quad (10)$$

$$-2 [W/m^2] < DNI < I_{CS} * \varepsilon_0 * 0.95 * (\cos(\theta_z))^{0.2} + 10 [W/m^2] \quad (11)$$

La tercera prueba:

Ecuaciones 13, 14, 15 y 16 son aplicables, si y sólo si, se cumple la ecuación 12, sino, la prueba no se puede aplicar. En este trabajo, se considera que los datos por debajo de 50 [W/m²] cumplen con la

tercera prueba, si y sólo si, todas las variables han cumplido con la segunda prueba.

$$DHI + DNI * \cos(\theta_z) > 50 [W/m^2] \quad (12)$$

$$GHI \leq 1.08 * (DHI + DNI * \cos(\theta_z)) \quad Si, \theta_z < 75^\circ \quad (13)$$

$$GHI \geq 0.92 * (DHI + DNI * \cos(\theta_z)) \quad Si, \theta_z < 75^\circ \quad (14)$$

$$GHI \leq 1.15 * (DHI + DNI * \cos(\theta_z)) \quad Si, 93^\circ > \theta_z \geq 75^\circ \quad (15)$$

$$GHI \geq 0.85 * (DHI + DNI * \cos(\theta_z)) \quad Si, 93^\circ > \theta_z \geq 75^\circ \quad (16)$$

Ecuaciones 17 y 18 son aplicables, si y sólo si, $GHI > 50 [W/m^2]$. Sino, no se pueden aplicar y en esos casos se impone la condición que las variables cumplen esta prueba, si y sólo si, todas las variables han cumplido con la segunda prueba.

$$DHI \div GHI < 1.05 \quad Si, \theta_z < 75^\circ \quad (17)$$

$$DHI \div GHI < 1.10 \quad Si, 93^\circ > \theta_z \geq 75^\circ \quad (18)$$

Donde, I_{cs} es la constante solar = $1367 W/m^2$ (según el World Radiation Center de Davos, Suiza) y E_o es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol.

Anexo B

Resultados Tercer Control de Calidad (CC3)

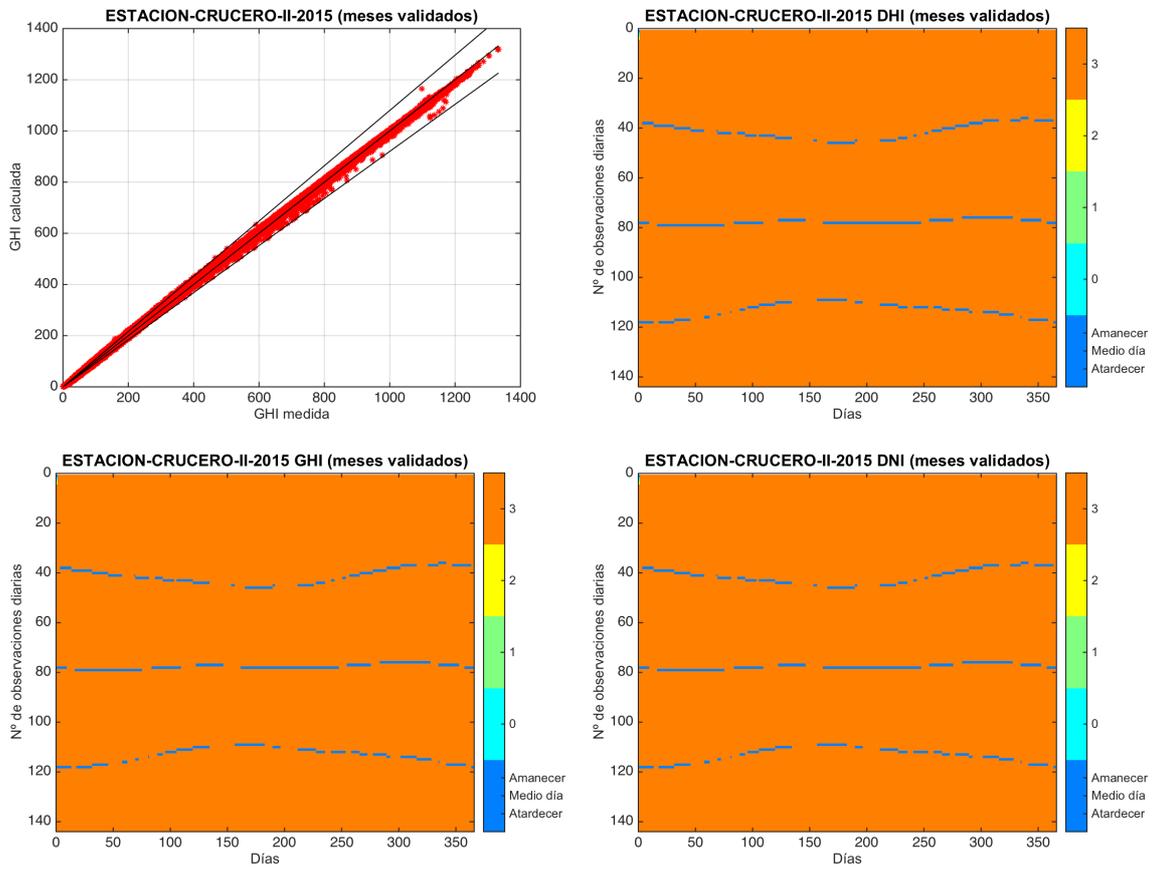


Figura 42. Tercer CC a los datos de 2015, posterior a la validación mensual.

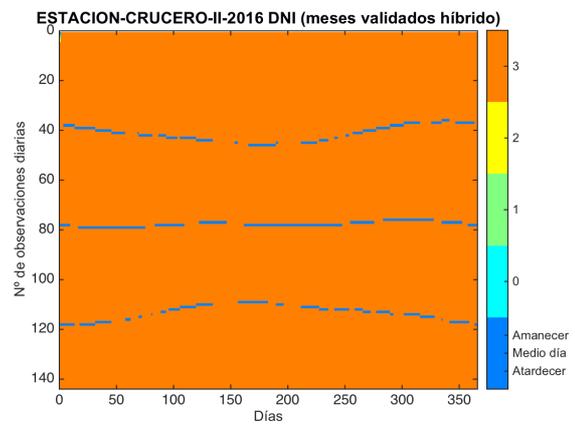
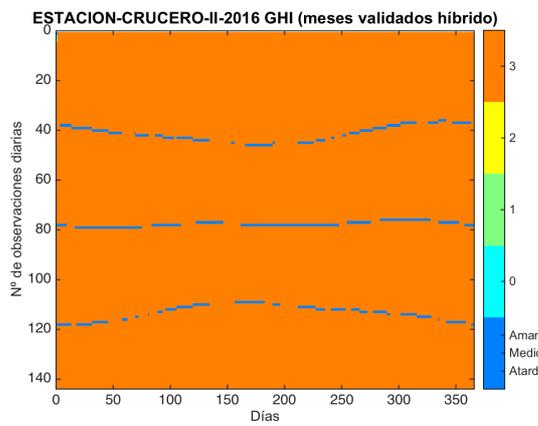
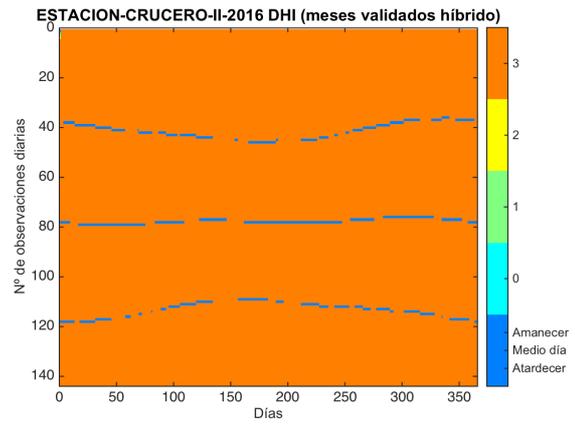
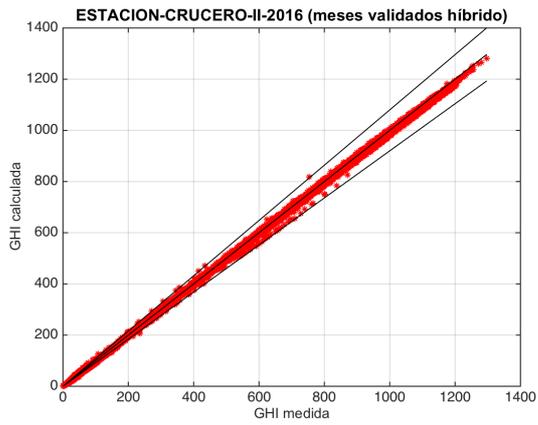


Figura 43. Tercer CC a los datos de 2016, posterior a la validación mensual.

Anexo C

Características técnicas de los sensores de medición de la estación meteorológica Crucero II

Equipo	Fabricante	Modelo	Características
Anemómetros	Theodor Friedrichs	4035.0000	Range: 0 – 70 [m/s], Threshold: 0.3 [m/s], Output: 0 – 700 [Hz], Operating Temperature: -25 to 80 [°C]
Veleta	Theodor Friedrichs	4123.0000	Measuring Range: 360 [°], Damping Ratio@3 [m/s] and initial deflection: < 0.3, Power supply: 10 to 30 [VDC], < 5 [mA]@12 [V], Output: Digital, serial 8 bit Gray Code, Operating Temperature: -25 to 80 [°C]
Termómetro	Theodor Friedrichs	3031.0050	Pt 100, DIN 60751 B, 1/3 tolerance, Measuring Resistance Pt 100 4 line, Range: -40 a 60 [°C], Output: 0 – 1 [V], Response Time: T63, Typical 4 [s], T90, aprox. 8 [s]
Higrómetro	Theodor Friedrichs	3031.0050	Capacitive Element, Range: 0 – 100 [%], Output: 0 -1 [V], Response Time: T63, Typical 10 [s], T90, aprox. 20 [s]
Piranómetro I	Kipp & Zonen	CMP21	10.81 [$\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$]
Piranómetro II	Kipp & Zonen	CMP21	9.63 [$\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$]
Pirheliómetro	Kipp & Zonen	CHP1	7.81 [$\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$]

Anexo D

Certificados de Calibración de los Sensores de Radiación

	Pyranometer	6000.0032 BG Page: 6 / 6
---	--------------------	-----------------------------

Certificate of Calibration

PROJECT NO.: 2012-20046
PYRANOMETER MODEL: 6000.0032
SERIAL NUMBER: 1032
SENSITIVITY: 10.81 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
at normal incidence on horizontal pyranometer
IMPEDANCE: 26 Ohm
TEMPERATURE: 22 \pm 2 °C

CALIBRATION PROCEDURE: The indoor calibration procedure is based on a side-by-side comparison with a reference pyranometer under an artificial sun fed by an AC voltage stabiliser. It embodies a 150 W Metal-Halide high-pressure gas discharge lamp. Behind the lamp is a reflector with a diameter of 16.2 cm. The reflector is 100 cm above the pyranometers producing a vertical beam. The reference and test pyranometers are mounted horizontally on a table, which can rotate. The irradiance at the pyranometers is approximately 500 W/m^2 . During the calibration procedure the reference and test pyranometer are interchanged to correct for any non-homogeneity of the beam. The dark offsets of both pyranometers are measured before and after the interchange and taken into account.

REFERENCE PYRANOMETER: CMP 21 sn070114 active from 01-01-/2012.

Hierarchy of traceability:

This pyranometer was compared with the sun and sky radiation as source under mainly clear sky conditions using the "continuous sun-and-shade method". The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The measurements were performed in Davos (latitude: 46.8143°, longitude: -9.8458°, altitude: 1588 m above sea level). The originally estimated uncertainty of the WRR relative to Si is 0.3 %.

The inclination of the receiver surfaces versus their horizontal position were set to 0.0 degrees, the instrument signal wire to the north. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities from 645 to 1043 with a mean of 819 W/m^2 . The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 29.2 to 49.9 with a mean of 39.5 degrees. The instrument's temperature ranged from +16.6 to +23.8 with a mean of +20.3 °C. The sensitivity calculation and the single measurements deviation (σ) are based on 291 individual measurements. The obtained sensitivity value and its expanded uncertainty (95 % level of confidence) are valid for similar conditions and are: 8.35 \pm 0.11 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ (but is corrected to 8.35 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. See "correction applied" below.)
Dates of measurements: 2011, August 1, 2, 11, 16 - 18.

Global radiation data were calculated from the direct solar radiation as measured with the absolute cavity pyrheliometer PMO2 (member of the WSG, WRR-Factor: 0.998618, based on the last International Pyrheliometer Comparison IPC-2005) and from the diffuse radiation as measured with a continuous disk shaded pyranometer CM 22 sn020059 with sensitivity 8.91 (ventilated with heated air, instrument-wire to the north).

Correction applied:

0.0 %
This correction was necessary to correct for the mean directional errors of the reference CMP 21 in Davos. This error is estimated measuring the cosine error for the mean angle of incidence at azimuth S-30° and S+30°. The reference CMP 21 now measures the vertical directed beam of the indoor calibration facility more correctly.

IN CHARGE OF TEST:

Date: 18 th January 2012 Signature: 

Technical data are subject to change!

THEODOR FRIEDRICHS & CO. Meteorologische Geräte und Systeme GmbH



Certificate of Calibration

PROJECT NO.: 2012-20046
PYRANOMETER MODEL: 6000.0032
SERIAL NUMBER: 1042
SENSITIVITY: 9.63 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
at normal incidence on horizontal pyranometer
IMPEDANCE: 27 Ohm
TEMPERATURE: 22 \pm 2 °C

CALIBRATION PROCEDURE: The indoor calibration procedure is based on a side-by-side comparison with a reference pyranometer under an artificial sun fed by an AC voltage stabiliser. It embodies a 150 W Metal-Halide high-pressure gas discharge lamp. Behind the lamp is a reflector with a diameter of 16.2 cm. The reflector is 100 cm above the pyranometers producing a vertical beam. The reference and test pyranometers are mounted horizontally on a table, which can rotate. The irradiance at the pyranometers is approximately 500 W/m^2 . During the calibration procedure the reference and test pyranometer are interchanged to correct for any non-homogeneity of the beam. The dark offsets of both pyranometers are measured before and after the interchange and taken into account.

REFERENCE PYRANOMETER: CMP 21 sn070114 active from 01-01-/2012.

Hierarchy of traceability:

This pyranometer was compared with the sun and sky radiation as source under mainly clear sky conditions using the "continuous sun-and-shade method". The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The measurements were performed in Davos (latitude: 46.8143°, longitude: -9.8458°, altitude: 1588 m above sea level). The originally estimated uncertainty of the WRR relative to SI is 10.3 %.

The inclination of the receiver surfaces versus their horizontal position were set to 0.0 degrees, the instrument signal wire to the north. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities from 645 to 1043 with a mean of 819 W/m^2 . The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 29.2 to 49.9 with a mean of 39.5 degrees. The instrument's temperature ranged from +16.6 to +23.8 with a mean of +20.3 °C. The sensitivity calculation and the single measurements deviation (n) are based on 291 individual measurements. The obtained sensitivity value and its expanded uncertainty (95 % level of confidence) are valid for similar conditions and are: 8.35 \pm 0.11 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ (but is corrected to 9.63 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. See "correction applied" below.)
Dates of measurements: 2011, August 1, 2, 11, 16 – 18.

Global radiation data were calculated from the direct solar radiation as measured with the absolute cavity pyrheliometer PMO2 (member of the WSG, WRR-Factor: 0.998618, based on the last International Pyrheliometer Comparison IPC-2005) and from the diffuse radiation as measured with a continuous disk shaded pyranometer CM 22 sn020059 with sensitivity 8.91 (ventilated with heated air, instrument-wire to the north).

Correction applied:

0.0 %
This correction was necessary to correct for the mean directional errors of the reference CMP 21 in Davos. This error is estimated measuring the cosine error for the mean angle of incidence at azimuth S-30° and S+30°. The reference CMP 21 now measures the vertical directed beam of the indoor calibration facility more correctly.

IN CHARGE OF TEST:

Date: 18 th January 2012 Signature: *J. A. C. Brudt*

Technical data are subject to change!

CERTIFICATE NUMBER 006634120874
PYRHELIOMETER MODEL CHP 1
SERIAL NUMBER 120874
SENSITIVITY 7.81 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
IMPEDANCE 27 Ohm
TEMPERATURE 22 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$
REFERENCE PYRHELIOMETER Kipp & Zonen CHP 1 snREF2 active from January 1, 2012
CALIBRATION DATE 11-Apr-2012 (recalibration is recommended every two years)
IN CHARGE OF TEST J.P. Vink

Calibration procedure

Exact interchange of test pyrheliometer and reference pyrheliometer in a horizontal parallel beam of light from a Xenonlamp. Full collimation angle of beam is 1.0°. Irradiance 500 \pm 50 W/m^2 . Roomtemperature 22 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$.

Hierarchy of traceability

This reference pyrheliometer was compared with the reference radiometer PMO2 of the World Radiation Center (WRC) using the sun as source. The reference radiometer is periodically calibrated against the World Standard Group (WSG), maintained at the WRC Davos. The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The originally estimated uncertainty of the WRR relative to SI is \pm 0.3%. The measurements were performed in Davos (latitude: 46.8143°, longitude: -9.8458°, altitude: 1588 m above sea level).

During the comparisons, the reference pyrheliometer received direct solar radiation with intensities ranging from 762 to 1004 W/m^2 , with a mean of 928 W/m^2 . The ambient air temperature ranged from +12.6 to +20.9 $^{\circ}\text{C}$ with a mean of +18.6 $^{\circ}\text{C}$. The sensitivity calculation is based on 566 individual measurements. The sensitivity and its expanded uncertainty (95% level of confidence) are only valid for similar environmental conditions and amount: 7.91 \pm 0.03 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$.

WRR-factor of PMO2: 0.998623 (from the last international Pyrheliometer Comparison, IPC-2010).

Date of measurements: 2011, August 2, 11, 16, 17.

Correction applied 0.0 %

No correction to the Davos sensitivity figure has been applied.

Justification of total instrument calibration uncertainty

The combined uncertainty of the result of the calibration is the positive "root sum square" of two uncertainties.

1. The expanded uncertainty due to random effects and instrumental errors during the calibration of the reference CHP 1 as given by the World Radiation Center in Davos is \pm 0.03/7.91 = \pm 0.38%. (See traceability text).

2. Based on experience the expanded uncertainty of the transfer procedure (calibration by non-simultaneous comparison) is estimated to be \pm 1%.

The estimated combined expanded uncertainty is the positive "root sum square" of these two uncertainties: $\sqrt{(0.38\%)^2 + 1^2}$ = \pm 1.1%.

Notice

The calibration certificate supplied with the instrument is at the date of first use. Even though the calibration certificate is dated relative to manufacture, or recalibration, the instrument does not undergo any sensitivity changes when kept in the original packing. From the moment the instrument is taken from its packaging and exposed to irradiance the sensitivity may deviate with time. See the "non-stability" value (% change in sensitivity per year) given in the radiometer specifications.