

Protocolo: verificación y medición de series históricas
para cálculo de ENFICC en plantas solares fotovoltaicas

31 de enero de 2018

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MEDICIÓN DE IRRADIACIÓN HORIZONTAL GLOBAL Y TEMPERATURA AMBIENTE	8
2.1. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS	8
Irradiación Horizontal Global (GHI)	9
Temperatura Ambiente (TA)	10
2.2. SELECCIÓN ZONA DE INSTALACIÓN	11
2.3. INSTALACIÓN	11
2.4. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN	12
Irradiación Horizontal Global (GHI)	12
Temperatura Ambiente (TA)	12
2.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	12
2.5.1. MÉTODO DE LLENADO DE SERIES DE TIEMPO	13
3. METODOLOGÍA DE AJUSTE Y CORRECCIÓN PARA ESTIMACIÓN DE SERIES DE LARGO PLAZO	15
3.1. Metodología Medición-Correlación-Predicción (MCP)	17
3.1.1. VALORACIÓN INFORMACIÓN DISPONIBLE	17
3.1.2. VERIFICACIÓN DE LAS SERIES DE DATOS SATELITALES	18
3.1.3. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE (LR)	22
3.1.4. RELACIÓN DE VARIANZAS (VR)	24
3.2. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN	26
3.2.1. Las Flores – Barranquilla	26
3.2.2. Univalle - Cali	29
3.2.3. Carmen de Bolívar	30
3.2.4. Metro Medellín – Medellín	31
3.2.5. UTM – Santa Marta	32
3.2.6. San Marcos – Sucre	33
3.2.7. Uribe – La Guajira	34
3.2.8. Fedearroz – Valledupar	35
3.3. EFECTOS DE LA CORRECCIÓN SOBRE EL CÁLCULO DE LA ENFICC	36
4. PROTOCOLO PARA LA VERIFICACION Y MEDICIÓN DE SERIES HISTÓRICAS	38
4.1. Requisitos mínimos para la medición de irradiación solar y temperatura ambiente	38
4.1.1. Medición	38
4.1.2. Llenado de datos	39

4.2.	Metodología para la verificación y ajuste de series de tiempo	41
5.	Referencias	43

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESO DE MEDICIÓN DE VARIABLES, FIGURA ELABORADA POR UNIANDES A PARTIR DE [9] Y [10]	8
FIGURA 2. ESQUEMÁTICO PARA LA SELECCIÓN DE PERÍODOS Y FRANJAS HORARIAS PARA LLENADO DE DATOS FALTANTES.	14
FIGURA 3. COMPARACIÓN HISTÓRICA PARA FUENTES DISPONIBLES	19
FIGURA 4. COMPARACIÓN IDEAM VS. ONI	19
FIGURA 5. COMPARACIÓN NREL VS. ONI	20
FIGURA 6. COMPARACIÓN SOLARGIS VS. ONI	20
FIGURA 7. COMPARACIÓN HISTÓRICA PARA FUENTES DISPONIBLES VS ONI, PROMEDIOS TRIMESTRALES	20
FIGURA 8. COMPARACIÓN IDEAM VS NREL, TIEMPO COMÚN 2013	21
FIGURA 9. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R^2 , TIEMPO COMÚN 2013	21
FIGURA 10. REGRESIÓN LINEAL AJUSTADA PARA EL TIEMPO COMÚN, 2013	23
FIGURA 11. RECONSTRUCCIÓN SERIE HISTÓRICA 10 AÑOS LR. AJUSTE CON 12 MESES	23
FIGURA 12. RECONSTRUCCIÓN SERIE HISTÓRICA 10 AÑOS PARA VR. AJUSTE CON 12 MESES	25
FIGURA 13. AJUSTE LINEAL PARA LAS FLORES, A) AJUSTE CON 3 MESES DE DATOS; B) AJUSTE CON 6 MESES DE DATOS; C) AJUSTE CON 9 MESES DE DATOS Y D) AJUSTE CON 12 MESES DE DATOS	27
FIGURA 14. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE BARRANQUILLA.	28
FIGURA 15. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	28
FIGURA 16. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	28
FIGURA 17. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE CALI	29
FIGURA 18. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	29
FIGURA 19. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	29
FIGURA 20. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE CARMEN DE BOLÍVAR.	30
FIGURA 21. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	30
FIGURA 22. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS.	31
FIGURA 23. RMSE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	31
FIGURA 24. MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	31
FIGURA 25. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	32
FIGURA 26. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE SANTA MARTA	32
FIGURA 27. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	32
FIGURA 28. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	33
FIGURA 29. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE SUCRE	33
FIGURA 30. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	33
FIGURA 31. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	34
FIGURA 32. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE LA GUAJIRA	34
FIGURA 33. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	35
FIGURA 34. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS.	35
FIGURA 35. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE VALLEDUPAR.	35
FIGURA 36. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	36
FIGURA 37. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	36
FIGURA 38 - DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA DIARIA PROMEDIO CALCULADA A PARTIR DE LAS SERIES DE 10 AÑOS CON RESOLUCIÓN HORARIA.	37
FIGURA 39. ESQUEMÁTICO PARA LA SELECCIÓN DE PERÍODOS Y FRANJAS HORARIAS PARA LLENADO DE DATOS FALTANTES.	40
FIGURA 40. METODOLOGÍA PARA VERIFICACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE SERIES HISTÓRICAS.	42

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN PARA CATEGORÍA BUSINESS (POLICY AND BUSINESS) [2]	7
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PIRANÓMETROS RECOMENDADOS SEGÚN LA NORMA ISO 9060:1990	10
TABLA 3. INTERVALOS DE CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN. OBTENIDO DE: [9]	10
TABLA 4. TERMÓMETROS RECOMENDADOS POR TIPO	10
TABLA 5. NORMATIVIDAD DISPONIBLE PARA TERMÓMETROS POR TIPO	12
TABLA 6. RESUMEN DATOS DE LAS ESTACIONES DE MEDICIÓN	18
TABLA 7. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. LR NREL	23
TABLA 8. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. LR SOLARGIS	24
TABLA 9. PARÁMETROS VR, CASO APLICADO	25
TABLA 10. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. VR NREL	26
TABLA 11. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. VR SOLARGIS	26
TABLA 12. PARÁMETROS VR PARA LAS FLORES, SENSIBILIDAD DE 4 NIVELES	27
TABLA 13. ENFICC BASE CALCULADA A PARTIR DE LAS SERIES DE TIEMPO ESTUDIADAS. TODOS LOS DATOS ESTÁN NORMALIZADOS CON BASE AL VALOR DE IDEAM.	37

1. INTRODUCCIÓN

La resolución CREG 201 de 2017 estableció la metodología para el cálculo de la Energía en Firme para el Cargo por Confiabilidad – ENFICC para plantas de generación solar fotovoltaica. Dicha Resolución establece el requerimiento de suministrar series de tiempo de 10 años o mayor duración en resolución horaria para la irradiación horizontal global (**GHI**) en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2) y la temperatura ambiente (**TA**) en unidades de grados Centígrados ($^{\circ}\text{C}$). Reconociendo la dificultad de contar con información de buena calidad para periodos de tiempo tan largos, la misma resolución establece la posibilidad de construir las series a partir de *fuentes secundarias* de información¹ siempre y cuando se cuente con al menos un (1) año de mediciones en sitio. Estas *fuentes secundarias* se refieren a bases de datos construidas a partir de modelos basados en información satelital o modelos NWP (Numerical Weather Prediction).

El objetivo de este documento es presentar un protocolo para la verificación y medición de series de tiempo históricas de GHI y Temperatura Ambiente. El protocolo se construye con base a una revisión detallada de la literatura, en particular las recomendaciones y buenas prácticas de la industria de la energía solar a nivel mundial, y una evaluación de éstas utilizando datos para varios puntos de la geografía colombiana.

Diferentes organizaciones y alianzas se han establecido con el propósito de desarrollar guías para la medición, la evaluación y el correcto uso de datos meteorológicos para la valoración, diseño y operación de proyectos solares de gran magnitud. Un ejemplo es la cooperación entre el Programa Ambiental de Las Naciones Unidas (UNEP), la Sociedad Internacional de Energía Solar (ISES) y la Agencia Internacional de Energía (IEA) a través del panel de expertos del Solar Heating & Cooling Program (SHC). Como resultado de este trabajo se han generado estándares y recomendaciones para la selección del tipo y calidad de información requerida por aplicación, a través de cinco criterios: i) Resolución espacial; ii) Longitud temporal de la serie; iii) Componentes de la radiación solar disponibles y; iv) Proceso de validación de la información [1]. La Agencia Internacional de Energía Renovables (IRENA)² [2] elaboró un reporte donde se presenta un resumen detallado de cada uno de los roles contemplados para un proyecto de energía solar y los requerimientos de información específicos en cada etapa del proyecto.

Dependiendo del rol de los involucrados (inversionistas, operadores, investigación y desarrollo (I+D), planeadores y tomadores de decisión) los requerimientos de información pueden ser diferentes en términos de la cantidad, incertidumbre admisible y resolución tanto temporal como espacial. Las mediciones directas realizadas en sitio resultan ser la mejor fuente de información para caracterizar la meteorología local, sin embargo, debido a la falta de mediciones de largo plazo y con el fin de cumplir con los requerimientos de información confiable de recurso³, es posible combinar mediciones en sitio con *fuentes secundarias* de información.

Existen gran variedad de bases de datos satelitales, de distribución libre o no, que varían en términos de resolución espacial, resolución temporal y aún más importante, utilizan diferentes metodologías para el cálculo de las variables (análisis de imágenes satelitales, reanálisis y/o modelos NWP). Es de anotar, que toda la

¹ En este documento también se hace referencia a las *fuentes secundarias* de información como *bases de datos satelitales* o *información satelital*.

² Agencia Intergubernamental que tiene como objetivo acompañar la transición hacia matrices energéticas renovables y que además sirve como una plataforma de colaboración y un repositorio de políticas, tecnología y conocimiento sobre energías renovables.

³ Datos históricos de largo plazo, en general por un periodo de 10 años. Sin embargo, existen fuentes que hacen referencia a la necesidad de datos por un periodo superior o igual a 30 e inclusive 50 años. Estos logran capturar variaciones en el recurso ocasionadas por tendencias con frecuencia de aparición superior a 10 años y eventos aislados como erupciones volcánicas [4].

literatura especializada, así como las recomendaciones internacionales apuntan a la necesidad de validar y adaptar las series de fuentes secundarias a las condiciones reales en tierra. Por ejemplo, en el informe de IRENA [2] se establece que las mediciones en sitio deben ser obligatorias para validar y refinar la información proveniente de fuentes secundarias. En otro informe conjunto de investigadores de la Universidad de Jaén en España, la Universidad de Exeter en el Reino Unido y el *Solar Consulting Services* de Estados Unidos [3], se reitera que una apropiada evaluación de recursos es crucial en las primeras etapas de prefactibilidad, en las que se necesitan bases de datos robustas que aseguren competitividad y financiamiento. Posterior a la construcción y puesta en operación, las campañas de medición proveen información invaluable para el seguimiento de operación y el pronóstico de generación [4]. La Tabla 1 resume los requerimientos para el caso de financiadores, inversionistas y desarrolladores, grupo objetivo de esta investigación según el informe de IRENA.

Tabla 1. Requerimientos de información para categoría BUSINESS (Policy and Business) [2]

	Mínima resolución espacial (km)	Mínima resolución temporal	Mínimo periodo de referencia [años]	Error de Sesgo (<5% GHI y <10% DNI (Direct Normal Irradiance))	Uso de fuentes de información independientes ⁴	Medidas en sitio ⁴
Pequeños proyectos PV	10	Horaria	5	Sí	Sí	Sí
Medianos proyectos PV	10	Horaria	10	Sí	Sí	Sí
Grandes desarrollos PV	10	Horaria	10	Sí	Sí	Sí

Si bien las mediciones en sitio de buena calidad sirven para validar y adaptar la información de fuentes secundarias, mediciones de baja calidad pueden resultar en la sobre o subestimación del recurso solar. Por ello es importante hacer énfasis en la calidad de la información recopilada y en los estándares que deben cumplir las campañas de medición en términos de calibración, operación y mantenimiento de los instrumentos de medición. Al respecto el Laboratorio de Energías Renovables Nacional de Estados Unidos (NREL) publicó el Manual de Buenas Prácticas para la Recolección y Uso de Datos de Recurso Solar para Aplicación en Energía Solar [5]. Este manual recoge información sobre la medición, modelamiento y ajuste de series de irradiación para el uso en los diferentes métodos de aprovechamiento de la energía solar. Otra fuente relevante es el proyecto MESOR (Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge) [6], iniciativa internacional para la comparación y evaluación de fuentes de información de recurso solar. Los diferentes documentos emitidos en el marco de este proyecto proveen información relevante para la evaluación y valoración de datos de energía solar [7]. Los anteriores referentes junto con la literatura técnica relevante constituyen el marco conceptual de este documento.

En el Capítulo 2 de este informe se establecen los estándares y recomendaciones mínimas para la medición de irradiación global horizontal y temperatura ambiente en una campaña de medición con miras a la validación de información obtenida de fuentes secundarias como NREL, SolarGis, Meteonorm⁵, entre otras. En el Capítulo 3 se presenta la Metodología para la Verificación y Ajuste de series de tiempo de fuentes secundarias y se analizará su eficacia en términos de reducción del error de sesgo en el cálculo de la ENFICC. Al respecto, se validó para diferentes puntos a lo largo del territorio nacional. Finalmente, con base en el estudio realizado, en el Capítulo 0 se presenta el protocolo con las condiciones mínimas para realizar una campaña de medición de la irradiación solar horizontal y la temperatura ambiente, así como para la verificación y ajuste de series de tiempo de fuentes secundarias.

⁴ Recomendado en todos los casos

⁵ Información disponible para el territorio nacional [37].

2. MEDICIÓN DE IRRADIACIÓN HORIZONTAL GLOBAL Y TEMPERATURA AMBIENTE

La medición precisa y exacta de la Irradiación Horizontal Global (*Global Horizontal Irradiation* – GHI) y la Temperatura Ambiente (TA) es esencial para la evaluación de recursos, diseño y operación de cualquier proyecto de energía solar. Estas variables pueden estar acompañadas de otras tales como precipitación y velocidad de viento, dependiendo del interés y la aplicación de la información. En la resolución CREG 201 de 2017, que establece la metodología para el cálculo de la energía en firme para plantas solares, se establece el requerimiento de proveer información de largo plazo (10 o más años) para GHI y TA [8], en este capítulo se recopilan las recomendaciones para la correcta medición de estas variables.

De acuerdo al documento *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications* de NREL [5] una campaña de medición adecuada incluye las etapas mostradas en la Figura 1 iniciando con la selección de los instrumentos adecuados de acuerdo a los estándares relacionados y la aplicación específica. Una vez establecido el tipo y la calidad de la información requerida se debe seleccionar adecuadamente el punto de instalación y seguir el procedimiento de instalación, verificación y puesta en servicio, operación y mantenimiento (incluyendo recalibraciones o verificaciones) indicado por el fabricante. Como es de esperar, los equipos utilizados para monitorear variables climáticas están expuestos a condiciones adversas y requieren un proceso de operación y mantenimiento adecuado, este debe hacerse conforme lo sugiere el fabricante.



Figura 1. Proceso de medición de variables, figura elaborada por UNIANDES a partir de [9] y [10]

2.1. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS

La correcta medición de las variables meteorológicas depende de una adecuada selección de los instrumentos. El principal recurso para la correcta selección, calibración, instalación y operación de instrumentos meteorológicos es la *Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación* (Edición de 2014) de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorology Organization – WMO). En esta guía se describen los

instrumentos y sistemas de medición más usados y constituye la base de las normas ISO9060, ASTM E2848 e IEC 61724-1.

Irradiación Horizontal Global (GHI)

La buena medición de la irradiación es esencial para el diseño e implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica. Es importante definir el nivel de exactitud y la incertidumbre requerida para la correcta selección de los instrumentos. De la familia de radiómetros disponibles para medir diferentes componentes de radiación solar se descarta el uso de Pirheliómetros, diseñados específicamente para la medición de la Irradiación Normal Directa (DNI). Para la medición de la radiación global horizontal se recomienda el uso de piranómetros montados sobre superficies horizontales y libres de obstrucciones.

Los piranómetros utilizan sensores termoelectrónicos o fotoelectrónicos con un campo de visión semiesférico de 2π estereorradianes. Este tipo de radiómetro se monta sobre una plataforma horizontal para medir la irradiación global horizontal. En esta ubicación el piranómetro tiene una visión de todo el cielo. Idealmente, el lugar del montaje debe estar libre de obstrucciones naturales o artificiales en el horizonte. El detector del piranómetro viene ubicado debajo de un domo de cuarzo tallado el cual protege al detector del ambiente y provee las propiedades ópticas consistentes para recibir la radiación solar semiesférica.

Tanto la ISO como la WMO han establecido clasificaciones y especificaciones para los instrumentos utilizados en la medición de irradiación solar [11] [9] [12] [13]. La clasificación se basa en la calidad del instrumento, reflejado en la incertidumbre esperada, así como el tiempo de respuesta del instrumento. Por el lado de la WMO, los piranómetros se clasifican como de Alta Calidad (High Quality), Buena Calidad (Good Quality) o Calidad Moderada (Moderate Quality). Según la WMO, Alta Calidad se refiere a un instrumento cercano al estado del arte y Buena Calidad se refiere a un instrumento que puede ser utilizado para la operación de una red [9]. Por su lado la ISO clasifica los piranómetros, en orden decreciente de exactitud, como de Patrón Secundario (Secondary Standard Class), Primera Clase (First Class) y Segunda Clase (Second Class) [11].

Las recomendaciones vigentes para la medición de la GHI sugieren el uso de instrumentos de la mejor calidad. Específicamente se sugiere el uso de Piranómetros de Patrón Secundario⁶ o al menos Primera Clase según ISO9060, piranómetro de Alta Calidad según WMO o piranómetro Clase A según IEC 61724-1. En la Tabla 2, se muestran algunas especificaciones generales que debe cumplir un piranómetro para pertenecer a las categorías mencionadas anteriormente. Se recomienda remitirse a las referencias [9] [11] [14] para más información. Adicionalmente, estas mismas especificaciones se encuentran en el documento de buenas prácticas publicado por NREL y otros institutos internacionales [5] [10] [15]. Para que los datos obtenidos por un instrumento sean de utilidad se debe contar con toda la información sobre la calidad del instrumento, así como un historial de la calibración, limpieza y mantenimiento de los equipos [16].

⁶ Es muy importante no confundir los piranómetros de Patrón Secundario “SECONDARY STANDARD” con de Segunda Clase “SECOND CLASS “. Estos últimos son de inferior calidad y no recomendados para esta aplicación. Ver documento de NREL [5].

Tabla 2. Características técnicas piranómetros recomendados según la norma ISO 9060:1990

Especificaciones según la norma ISO 9060:1990	Clase	
	Patrón secundario	Primera clase
Respuesta en el tiempo	< 15 s	< 30 s
Offset Respuesta a 200 W/m ² de radiación térmica neta	+ 7 W/m ²	+ 7 W/m ²
Cambios en la respuesta por año	± 0.8%	± 1.5%
No – linealidad: Desviación para la respuesta a 500 W/m ² , debido a cambios en la irradiación entre (100 -1000) W/m ²	± 0.5%	± 1 %
Respuesta por la temperatura: Debido a cambios en la temperatura ambiente en un intervalo de 50 °C.	2%	4%
Respuesta por inclinación: Desviación en la respuesta con cambios en la inclinación para una irradiación de 1000 W/m ²	± 0.5%	± 2 %

Temperatura Ambiente (TA)

Para la medición de temperatura ambiente es recomendable utilizar un termómetro eléctrico, los cuales pueden ser de resistencias eléctricas, termistores o termopares. El instrumento se debe ubicar a una altura superior a 1.5 metros sobre el piso. Los rangos de calibración y de medición, así como otras características básicas se muestran en la Tabla 3 [9].

Tabla 3. Intervalos de calibración y medición. Obtenido de: [9]

Tipo de termómetro	Ordinario
Rango de uso (°C)	-30 a 45
rango de calibración (°C)	-30 a 40
Error máximo	< 0.2 °C
Máxima diferencia, entre las correcciones máximas y mínimas dentro del rango	0.2 °C
máxima variación de corrección en un intervalo de 10° C.	0.1 °C

Dependiendo del tipo de termómetro, la Tabla 4 presenta las características recomendadas de acuerdo con [9].

Tabla 4. Termómetros recomendados por tipo

Tipo	Recomendado
Termómetro de resistencia eléctrica	Termómetro de resistencia de platino (PT100)
Termómetro termistor	Mezclas de óxidos metálicos sinterizados
Termómetro termopar	Combinaciones de cobre/constantán o hierro/ constantán.

2.2. SELECCIÓN ZONA DE INSTALACIÓN

El punto de instalación debería representar las condiciones climáticas generales del área de instalación de un posible proyecto, de esta forma debe estar alejado de obstrucciones como edificios, árboles y otras estructuras. Los manuales de buenas prácticas establecen los siguientes requerimientos para la instalación de los instrumentos para la medición de Irradiación Global Horizontal y Temperatura Ambiente [10], [9]:

- Los instrumentos no deben ser instalados cerca de paredes claras u otros objetos que puedan reflejar radiación sobre el medidor.
- Se prefieren campañas de medición realizadas en terrenos planos, evitar colinas y zonas con pendientes marcadas.
- Para zonas aisladas debe proveerse un sistema de transmisión de datos para evaluación remota, en general a través de red celular, línea telefónica o Ethernet. Se recomienda realizar pruebas de soporte para envío y almacenamiento de información. Para áreas que no cuenten con mecanismos tradicionales, debe considerarse incorporar un dispositivo de transmisión satelital.
- No debe existir ningún obstáculo por encima del plano de detección dentro del rango azimutal de salida y puesta del sol durante todo el año; cualquier obstrucción por encima del horizonte afecta las mediciones y conduce a errores. En los lugares donde no es posible evitar obstrucciones, los detalles completos del horizonte y las obstrucciones deben incluirse en la descripción de la estación, ello para facilitar una evaluación subsiguiente de su impacto.
- Tomar las medidas requeridas para evitar aves en reposo y anidación alrededor del punto de instalación.
- Evitar proximidad a cualquier fuente emisora de polvo, aerosoles, hollín u otras partículas.

2.3. INSTALACIÓN

La instalación de cualquier instrumento de medición *deberá realizarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante*. Otros aspectos tales como: disposiciones de seguridad de los equipos, interacción entre distintos sensores, que la radiación reflejada desde el suelo o la base no afecten la medición y evitar superficies reflectantes a los lados del instrumento, deben tenerse en cuenta en el momento de la instalación.

Se recomienda revisar la sección 7.3.3.2 de la referencia [9] para instalación de instrumentos para medición de la Irradiación Horizontal Global.

De manera general, el piranómetro se debe ubicar sobre una superficie horizontal, teniendo especial cuidado que la superficie en la que se instale no sea, ni se encuentre, sometida a un ambiente corrosivo o que puede llegar a dañar el instrumento.

Para el caso específico de los termómetros, los requisitos de instalación más importantes son:

- Instalar los dispositivos a una altura superior a los 1.5 m sobre el piso⁷
- Proteger el sensor de la radiación solar, para esto la WMO recomienda instalar el termómetro dentro de una garita de estación meteorológica o equivalente para evitar el fenómeno de auto calentamiento. Ninguna parte del sensor de temperatura debe ser visible desde el exterior.

⁷ La altura de instalación es un punto importante debido a los pronunciados gradientes verticales de temperatura que existen en la capa de atmósfera más cercana a la tierra .

2.4. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

Irradiación Horizontal Global (GHI)

La sección 7.3.1 de la referencia [9] describe en detalle los diferentes métodos de calibración y verificación de piranómetros para la medición de la Irradiación Horizontal Global. La calibración del piranómetro esta estandarizada por la norma ISO 9847:1992 y siempre es importante seguir los procedimientos indicados por el fabricante.

Temperatura Ambiente (TA)

La calibración de estos instrumentos esta estandarizada por la WMO, ASTM y la IEC. Por ejemplo, dependiendo del tipo de instrumento, en ASTM existen diferentes normas y estándares por cumplir, estas se reportan en la Tabla 5.

Tabla 5. Normatividad disponible para termómetros por tipo

Título	Designación
Termómetros de resistencia y termistores	E644 -11, E879 -12, E1173/ E1173M – 08(2014), E2593 -12, E2821 -13
Calibración de Termopares	E207 – 08(2015) e1, E220 – 13, E230/ E230M -12, E452 – 02(2013)

Para garantizar el óptimo desempeño de los instrumentos, se requiere verificar su calibración (por ejemplo, mediante la comparación con un patrón calibrado) por lo menos una vez cada año [9].

2.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La operación y mantenimiento de los piranómetros y termómetros se debe realizar siguiendo las recomendaciones establecidas por el fabricante, incluyendo actividades de limpieza, mantenimiento y recalibraciones, en los manuales de uso. Generalmente se tienen tareas específicas diarias, mensuales y anuales. A continuación, se muestran algunas de dichas tareas: [17]

- Diario
 - Es necesario limpiar el domo del piranómetro antes del amanecer ya que dependiendo de la zona se puede acumular cantidades importantes de polvo, contaminantes, o si es una zona cercana al mar, la sal también puede afectar las mediciones realizadas.
- Mensual
 - Los piranómetros traen un desecante, generalmente Gel de Sílica, con el fin de eliminar la humedad en el instrumento. Este desecante debe ser reemplazado cuando ocurre un cambio de color en el gel de sílica o en intervalos recomendados por el fabricante. Es importante revisar dependiendo de la humedad de la zona semanal o mensualmente.
- Anual
 - La tarea anual pasa por revisar los circuitos eléctricos, verificar que las conexiones se encuentren en buen estado, limpiar todas las entradas y finalmente revisar el montaje de la estación en general, y especialmente que el lugar donde este montado el piranómetro esté totalmente horizontal.

Con el fin de verificar la calidad de los datos e identificar posibles sesgos debido a contaminación o daño de un instrumento, es **recomendable** el uso de instrumentación redundante con su propio *datalogger* para evitar un punto de falla centralizado que pueda causar pérdida de información de acuerdo con la norma IEC 61724-1 vigente. Además, la instrumentación redundante ayuda a minimizar la pérdida de datos causada por eventos fortuitos. Se entiende por mediciones o información redundante aquella obtenida por un segundo sistema de medición (Irradiación Horizontal Global y temperatura ambiente) independiente localizado en el área de desarrollo del proyecto o mediciones indirectas. Por ejemplo, es posible calcular la GHI a partir de la medición de irradiación directa y difusa. Este tipo de mediciones son efectivas para realizar controles de calidad o **completar información faltante**.

Se debe contar con un registro de las actividades de limpieza y mantenimiento de los equipos de medición según lo establecido en los manuales de operación de los instrumentos o lo establecido en la guía de la WMO [9]. Estas deben incluir actividades de limpieza, mantenimiento y revisión general de los sistemas de medición y adquisición de datos.

La frecuencia de muestreo se configura dependiendo del tiempo de respuesta del instrumento y las características del *datalogger*. El sistema de adquisición debe estar configurado para almacenar información como mínimo cada diez (10) minutos, incluyendo información sobre el número de datos utilizados para el cálculo de la media, así como la desviación estándar. Se debe realizar algún tipo de control de calidad de los datos obtenidos. Estos pueden incluir controles automáticos y visuales. Los datos que no pasen los controles de calidad deben ser separados y analizados en detalle, los que pasan los controles de calidad son agregados y archivados en **resolución horaria como mínimo**. El dato correspondiente a una franja horaria dada, por ejemplo, las 6:00, debe corresponder al valor medio de los datos tomados entre las 6:00 y las 6:59 **hora local colombiana**.

2.5.1. MÉTODO DE LLENADO DE SERIES DE TIEMPO

Una campaña de medición de datos meteorológicos en sitio, con los requerimientos de calidad establecidos para la correcta planeación de un proyecto energético, requiere de monitoreo y controles continuos. Pese a la aplicación de las mejores prácticas, siempre es posible que las mediciones se vean interrumpidas por imprevistos tales como daños, desconexiones y otras circunstancias fortuitas. Las mediciones complementarias (ya sea por instrumentación redundante como fue descrito en la sección anterior o de estaciones cercanas con la misma orografía según criterio del dictaminador técnico) pueden ser usadas para llenar datos faltantes de la instrumentación principal.

De no contar con información redundante, se hace necesario llenar datos faltantes mediante alguna técnica estadística que permita capturar el comportamiento de la variable a medir durante el tiempo faltante. Es de anotar que cualquier método de llenado se basa en el comportamiento y tendencia de los datos existentes y por ende sería imposible predecir comportamientos anómalos que pudiesen ocurrir durante el periodo faltante.

En la literatura existen varias metodologías para el llenado de datos faltantes. Desde metodologías basadas en simples interpolaciones, hasta la aplicación de descomposición espectral han sido desarrolladas para diferentes aplicaciones con diferentes niveles de complejidad. El propósito de esta sección es establecer una metodología sencilla, capaz de llenar datos faltantes de las mediciones en sitio, manteniendo las tendencias observadas a partir de las mediciones. Es importante mencionar que esta metodología se propone suponiendo que se cuenta con el requerimiento mínimo de un año de medición. De contar con más tiempo de medición, se podría recurrir a metodologías más sofisticadas.

La metodología para el llenado de datos se desarrolla bajo la suposición de que los datos de una misma franja horaria están distribuidos de manera normal. Los parámetros del modelo de distribución normal se calculan a

partir de los datos correspondientes a la misma franja horaria del dato o datos faltantes en periodos alrededor del periodo faltante.

Se seleccionan periodos de la misma duración de los datos faltantes anterior y posterior al período vacío para no generar sesgos. La Figura 2 muestra de manera esquemática la estructura de la metodología. Los datos se toman en la misma franja horaria del dato faltante.

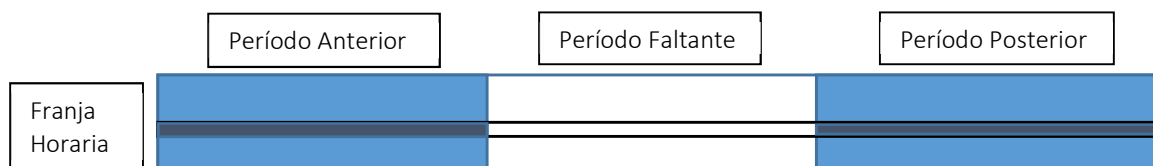


Figura 2. Esquemático para la selección de periodos y franjas horarias para llenado de datos faltantes.

El procedimiento concreto se desarrolla así:

1. Identificar los periodos con datos faltantes y dividir en dos grupos según sus franjas horarias:
 - a. De las 20:00 – 4:00: No existe radiación por lo tanto los vacíos que existan en este grupo toman el valor de 0.
 - b. De 5:00 – 19:00: Para este grupo de datos se procede de la siguiente manera:
 - i. Se toman los datos de los periodos anterior y posterior correspondientes a la misma franja horaria de los datos faltantes. Los periodos anterior y posterior tienen la misma longitud del periodo faltante.
 - ii. Se calcula la media y desviación estándar de los datos de los periodos anterior y posterior.
 - iii. Se seleccionan de manera aleatoria valores de radiación a partir de una distribución normal con media y desviación estándar igual a la calculada en el paso anterior para llenar los datos faltantes.

Para el llenado de datos de temperatura, se sigue el mismo procedimiento con la única diferencia de que no existen franjas donde la temperatura sea cero (0), por lo tanto, se sigue el procedimiento para datos en todas las franjas horarias.

El procedimiento establecido en esta sección permite llenar con datos que siguen las tendencias establecidas en los periodos adyacentes, pero de ninguna manera permitiría predecir comportamientos diferentes o anómalos que pudieran haber ocurrido durante el periodo con datos faltantes. El cálculo de la ENFICC requiere de una caracterización de la disponibilidad del recurso promediado mensualmente. Debido a esto, es importante contar con suficientes datos que permitan, de manera razonable, estimar la disponibilidad durante un mes dado. Por esta razón series de tiempo con el requerimiento mínimo de un año de duración, medidas en sitio, con datos faltantes por más de **dos semanas consecutivas o en total con más del 5%** de datos faltantes no son aceptables ya que conducirían a sesgos y malas estimaciones de las condiciones meteorológicas en la zona. Si se aporta información superior o igual a cinco (5) años de mediciones en sitio se admitirán vacíos de hasta cuatro (4) semanas consecutivas en resolución horaria, en este caso el llenado de datos deberá realizarse con un modelo autoregresivo y ser avalado por el dictaminador técnico.

3. METODOLOGÍA DE AJUSTE Y CORRECCIÓN PARA ESTIMACIÓN DE SERIES DE LARGO PLAZO

Los datos medidos en sitio son la mejor fuente de información para la caracterización de la meteorología de un lugar específico. Debido a la complejidad asociada a realizar mediciones de buena calidad, no existen muchos puntos con mediciones confiables y con información para largos periodos de tiempo como los requeridos para una correcta caracterización de la climatología de un lugar. Esto es especialmente cierto para Colombia. Las recomendaciones internacionales señalan que como mínimo se requieren datos históricos de 10 años para poder capturar los ciclos climáticos de larga duración que pueden existir en algún lugar específico. Incluso hay fuentes que hacen referencia a la necesidad de datos por un periodo superior o igual a 30 e incluso 50 años para capturar eventos con ocurrencia en periodos más largos. Para solventar la falta de datos medidos, la industria ha recurrido al uso de modelos basados en imágenes satelitales. La resolución CREG 201 de 2017 acepta el uso de dichas *fuentes secundarias* como base para la caracterización de la climatología local. Sin embargo, existe amplia evidencia en la literatura que es necesario adaptar los datos de estas fuentes secundarias mediante el uso de mediciones en tierra, con el fin de reducir el sesgo y mejorar la calidad de la aproximación.

El objetivo fundamental del análisis y evaluación de recursos, solar, hídrico, eólico, etc., es entender el comportamiento del recurso disponible, las variaciones que éste presenta durante un año y a largo plazo, e identificar posibles fenómenos que lo puedan afectar. Esta información resulta relevante para elaboración de políticas, seleccionar la tecnología adecuada para una aplicación determinada y gestionar la operación de sistemas de generación [5]. Aunque la información resultante del análisis de imágenes satelitales o Predicción Numérica de Condiciones Climáticas se ha convertido un método aceptado para la caracterización del recurso a escalas espaciales globales, continentales e inclusive regionales, tiene limitaciones asociadas a falta de información tridimensional de la microfísica y óptica de las nubes [3] e información de rugosidad del terreno a nivel local. Sobre este último aspecto, un estudio reciente del BID sobre complementariedad eólica, solar e hídrica en Colombia subraya la precisión de este tipo de modelos en grandes longitudes de terrenos planos. Sin embargo, en terrenos con topografías complejas como riberas y cadenas montañosas los datos pueden contener fuertes sesgos positivos o negativos [18].

En algunos casos particulares, SolarGIS puede proporcionar valores de GHI dentro de un 4% para ciertas localizaciones, sin embargo, la exactitud de las predicciones se puede ver afectada por condiciones geográficas y ambientales. Entre las listadas por la misma compañía se encuentran climas tropicales húmedos y regiones costeras (menos de 15 km del agua) y regiones que no cuentan con mediciones terrestres de buena calidad, caso colombiano. Cabe anotar que los datos de SolarGIS no han sido validados para Colombia, lo que hace necesario un protocolo de verificación básico para establecer la exactitud y calidad de las series de tiempo.

Iniciativas como la Base de datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB, por su nombre en inglés) y el Proyecto de Evaluación de Recursos Solares y Meteorológicos (SOLRMAP, por su nombre en inglés) desarrollados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL) tienen la intención de mejorar la calidad de la información recolectada y facilitar el acceso a información de largo plazo de buena calidad. Estos proyectos pretenden disminuir la incertidumbre asociada a información de largo plazo (obtenida a través de imágenes satelitales, por ejemplo) al incorporar y ajustar dichas series con información de calidad y baja incertidumbre, medida en sitio [19]. En la literatura actual es posible encontrar numerosos estudios y referencias en las que se unen diversos modelos para corregir las posibles diferencias existentes entre la información histórica obtenida a través de fuentes secundarias y el comportamiento de mediciones en sitio [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26].

Por ejemplo, en [24] se desarrolla un modelo de ajuste polinómico de tercer grado para optimizar el estimador de error de sesgo entre los valores DNI obtenidos a partir de análisis satelitales y mediciones en sitio para dos

puntos diferentes en España y Argelia. En este caso se utilizan cinco evaluadores de error: sesgo medio (MB), sesgo medio relativo (MBE), desviación cuadrática media (RMSEn), desviación estándar de la diferencia (SDD) y finalmente prueba de Kolmogorov-Smirnov Integral (KSI%). El autor reporta una mejora considerable para los estimadores MB y un error del 2% para el estimador de sesgo al corregir una serie de 10 años a partir del polinomio ajustado con un tiempo de entrenamiento de un año.

En [21], el autor propone combinar dos fuentes de información en un modelo que reduzca el error asociado al valor de DNI, a través de un promedio ponderado de los valores para cada fuente de información. El valor o peso asociado a cada una de las fuentes de información se determinó como la inversa de la medida de incertidumbre asociada a cada fuente de información respecto a la información medida en sitio. En cuanto a evaluadores de error se utilizaron sesgo medio (MB) y desviación cuadrática media (RMSD). De igual manera se hace referencia a uso de la prueba de Kolmogorov-Smirnov Integral (KSI) en la evaluación de series satelitales contra mediciones en sitio.

La empresa 3TIER, proveedora de bases de datos provenientes de análisis de imágenes satelitales, desarrollo un estudio sobre este tema [26]. En éste se utilizan dos modelos diferentes para reducir el error asociado a la estimación de generación energética requerida para estudios de financiamiento. Al igual que en los modelos anteriores, en este caso se utiliza información satelital de largo plazo e información medida en sitio durante un periodo corto de tiempo. El primer método corrige la radiación de un modelo Clear Sky (cielo despejado) utilizando información de características ópticas de aerosoles en la atmosfera. Este modelo no resulta adecuado para el propósito de este estudio, ya que no se tiene acceso al modelo de análisis de imágenes satelitales ni al modelo Clear Sky de corrección utilizado en este tipo de metodologías. Por su parte el segundo método busca corregir el error de sesgo de modelos satelitales independientes haciendo uso de mediciones en sitio a través del modelo MOS (por su nombre en inglés, Model Output Statistics). MOS utiliza la optimización de una regresión multilínea para remover el error de sesgo y ajustar la varianza de los valores de DNI obtenidos a través de modelos satelitales respecto a mediciones de corto plazo tomadas en sitio. Este método ha sido aplicado ampliamente en la industria eólica con excelentes resultados. La corrección propuesta fue aplicada en cinco diferentes locaciones con diversidad de climas y fuentes satelitales, en específico los autores pretenden determinar la longitud mínima de mediciones de corto plazo en sitio que deben ser utilizadas para realizar un ajuste adecuado de la información. Los resultados obtenidos, evaluados a través de error medio cuadrático (RMS) muestran que el periodo mínimo de información requerido es de 12 meses, reportando errores entre 0,44% y 3,40% dependiendo de la zona evaluada.

En general, el resultado obtenido al ajustar y corregir series provenientes de fuentes secundarias está determinado por dos factores: i) la calidad de las mediciones realizadas en la zona de interés en términos de: variables medidas, equipos, mantenimiento, redundancia y validación y; ii) la distancia geográfica entre el punto de medición y el punto de información secundaria seleccionado. Una distancia superior a 10 km entre el punto de medición y la localización de la serie secundaria pueden resultar en variaciones importantes con sesgos positivos o negativos [2]. De esta forma se establece el requerimiento de proveer información medida en la zona de interés o localizada a una distancia inferior de 10 km.

Finalmente, en [16] se realiza un estudio detallado de los requerimientos que debería tener la información para acceder a fuentes de financiación (*'Bankable Data Set'*). En este se hace énfasis en la importancia de mediciones y monitoreo en sitio para establecer la irradiación solar en el punto exacto de interés de un proyecto, establecer la variabilidad de corto plazo del recurso y proveer una base sólida de información para corregir los datos obtenidos de fuentes secundarias como modelos satelitales o NWP. Este tipo de procedimientos se conocen generalmente como MCP, por su nombre en inglés (*Measure Correlate Predict*), actualmente son el estándar para reconstrucción de series eólicas obteniendo excelentes resultados y se tiene reporte de su vigencia para la corrección y reconstrucción de datos solares [20]. Además, resalta la importancia de obtener series de tiempo adecuadas por un periodo igual a superior a 10 años, para establecer el comportamiento histórico y la variabilidad interanual del recurso para un punto específico. En cuanto al periodo común entre series

secundarias y mediciones en sitio se hace referencia a información entre 1 y 2 años. Cómo se demostró en [26], el aumento en el tiempo de medición con el que se corrige el sesgo existente en series satelitales o NWP logra disminuir el error asociado a la serie de largo plazo.

3.1. Metodología Medición-Correlación-Predicción (MCP)

De acuerdo con la información presentada hasta el momento, en esta sección se introducen dos modelos propuestos para corregir el sesgo existente en bases de datos de información secundaria (en este caso se estudian las bases de datos de NREL - NSRDB y SolarGis) con respecto a mediciones en sitio. En general los modelos utilizados para corregir errores de sesgo utilizan diversas metodologías, en su mayoría regresiones lineales y no lineales, optimizadas para cumplir con un nivel de error permitido, manteniendo las características de la serie original. Este es el principio que se utiliza en los modelos Medición – Correlación - Predicción MCP [16] [20] que serán los explorados en este documento por su sencillez y eficacia.

El punto de partida para la metodología de evaluación y ajuste de las series de tiempo son: i) información de referencia (REF) de largo plazo (>10 años), e ii) información de corto plazo medida adecuadamente en el punto objetivo (OBJ) por al menos un año. La información de referencia y la información medida en el punto objetivo deben contar con, al menos, un año de datos simultáneos ("*overlap*") con los que se hará el ajuste del modelo que relaciona el comportamiento de ambas series.

En esta sección se presenta la comparación de dos métodos MCP. El primero hace uso de una regresión lineal simple y el segundo un modelo lineal basado en la relación de varianzas para reconstruir el comportamiento de una variable en términos de otra, cuyo valor es conocido en el horizonte de tiempo deseado. Este método ha sido utilizado ampliamente en la industria de la energía eólica convirtiéndose en el estándar aceptado para reconstrucción de series de largo plazo [27] y [28]. En este documento demostramos su utilidad en series de tiempo solar.

Con el fin de brindar un panorama completo sobre el análisis realizado, inicialmente presentamos los datos con los que se validó la metodología.

3.1.1. VALORACIÓN INFORMACIÓN DISPONIBLE

El modelo se implementó y evaluó para 8 puntos con mediciones en sitio realizadas por IDEAM, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume los puntos de medición y los periodos disponibles para cada uno, adicionalmente se obtuvo información satelital de NREL (<https://nsrdb.nrel.gov/international-datasets>) para los mismos 8 puntos de referencia disponibles. Se contó con datos de la base de datos SolarGis en uno de los puntos.

Tabla 6. Resumen datos de las estaciones de medición

Nombre Base	Tipo	Fecha inicial	Hora Inicial	Fecha Final	Hora Final	Faltantes representativos
Carmen de Bolívar	agrometeor.	28/02/2006	18:00	13/07/2017	4:00	No hay información de los años 2010 y 2011
Estación Metromedellín	Urbana	2/07/2005	1:00	18/01/2017	11:00	No hay información del año 2010
Uribia Guajira	agrometeor.	19/04/2005	11:00	11/07/2017	7:00	
Fedearroz Valledupar	Urbana	1/09/2005	17:00	10/07/2017	8:00	
Las Flores Barranquilla	Urbana	4/11/2009	1:00	13/07/2017	17:00	No hay información previa a noviembre 2009
San Marcos Sucre	agrometeor.	27/07/2005	1:00	19/01/2017	12:00	No hay información del año 2008
Univalle Cali	Urbana	23/11/2006	1:00	23/05/2017	11:00	
UTM Santa Marta	Urbana	16/08/2007	10:00	11/07/2017	1:00	

Es de notar que la información del IDEAM, para algunas ubicaciones tiene vacíos importantes (un año o más). Tampoco se cuenta con información sobre la calibración de los instrumentos utilizados, los estándares y protocolos de medición y en general de la calidad de los datos medidos.

A continuación, se muestra el método que se utilizó con el fin de llenar los vacíos encontrados en las series de tiempo de radiación y temperatura, cabe resaltar que estas metodologías se vuelven imprecisas cuando se debe completar más del 5% de los datos [29] [30] [31].

3.1.2. VERIFICACIÓN DE LAS SERIES DE DATOS SATELITALES

Con el fin de establecer la validez de las bases de datos satelitales, se inició confirmando que las series de fuentes secundarias representaran de manera adecuada la climatología en el lugar correspondiente. La Figura 3 compara la información disponible en dos fuentes de información secundaria, NREL y SolarGis, con mediciones en sitio en un punto geográfico particular suministrados por IDEAM (los datos se presentan normalizados con respecto al valor máximo de la serie de IDEAM). Para este caso, se puede observar que las fuentes secundarias sistemáticamente sobreestiman el recurso. Para el punto específico reportado en esta figura, la serie de NREL tiene un error de sesgo medio de 20,2% con respecto a IDEAM. Por su parte SolarGis tiene un error de sesgo medio de 24,6% con respecto a IDEAM.

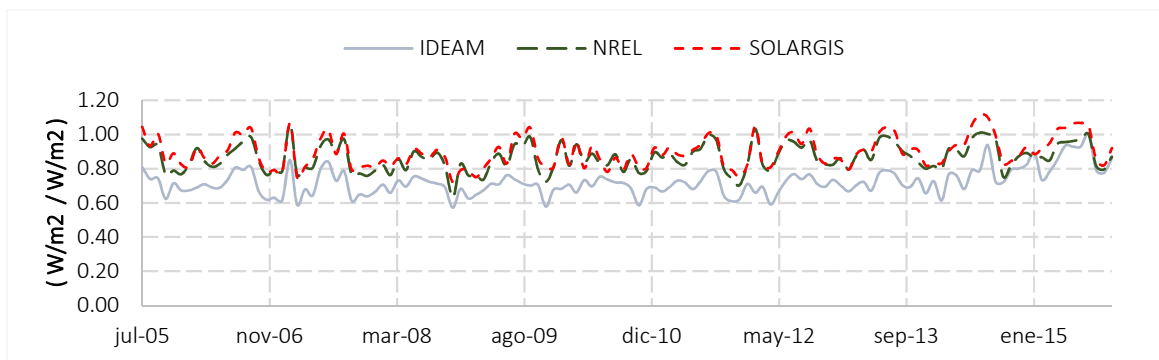


Figura 3. Comparación histórica para fuentes disponibles

Con la intención de verificar que las series capturen la aparición de eventos críticos como el Niño, se compararon cada una de las series históricas de todas las fuentes disponibles con el Índice Oceánico del Niño (ONI⁸). Las comparaciones se presentan en las Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6, para IDEAM, NREL y SolarGis, respectivamente. A partir de estas es posible identificar que IDEAM, como es de esperarse, captura el último fenómeno del niño (2015) para el que el ONI alcanzó un valor máximo de 2.6. Este comportamiento también es evidente en la comparación realizada para SolarGis, mientras que NREL por su parte se mantiene parcialmente constante para el periodo 2015.

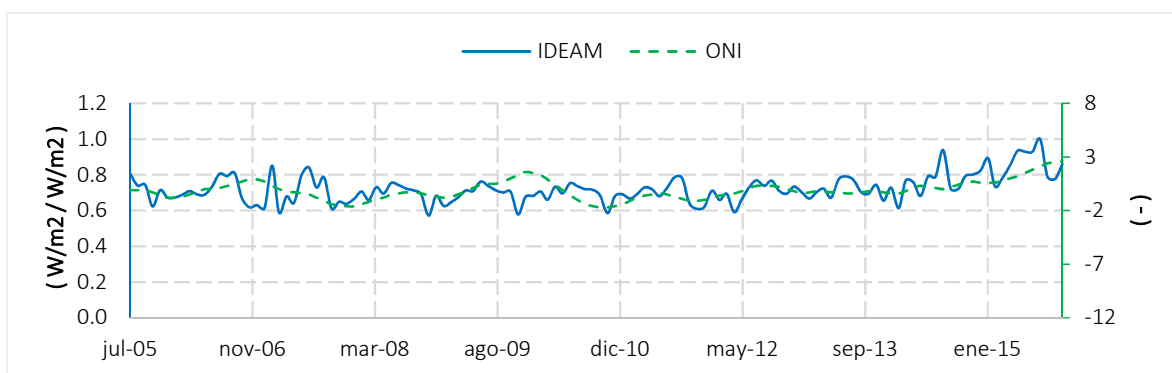


Figura 4. Comparación IDEAM vs. ONI

⁸ Siguiendo la descripción del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (NWS), el Índice Oceánico de El Niño (ONI) es uno de los indicadores de monitoreo de aparición e intensidad de un evento de El Niño o La Niña con base en el aumento o disminución de la temperatura superficial del océano (SST Sea Surface Temperature) [35] [36].

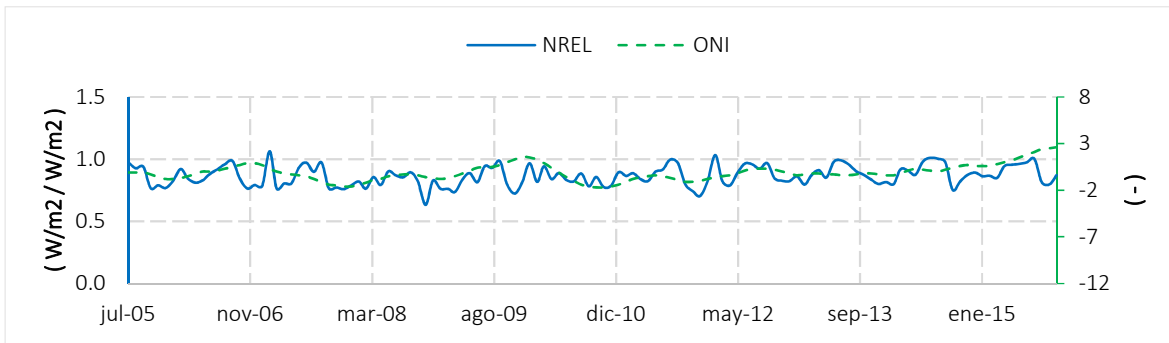


Figura 5. Comparación NREL vs. ONI

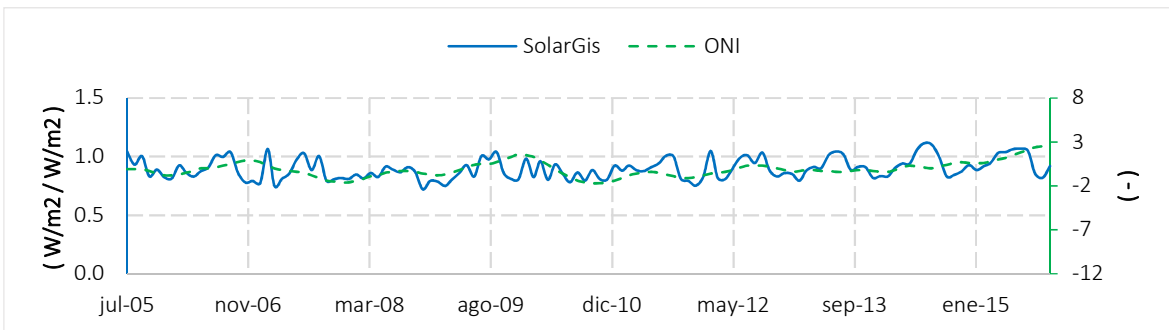


Figura 6. Comparación SolarGis vs. ONI

La Figura 7 muestra una comparación histórica para las diferentes fuentes que permite identificar las características generales, así como diferencias entre ellas.

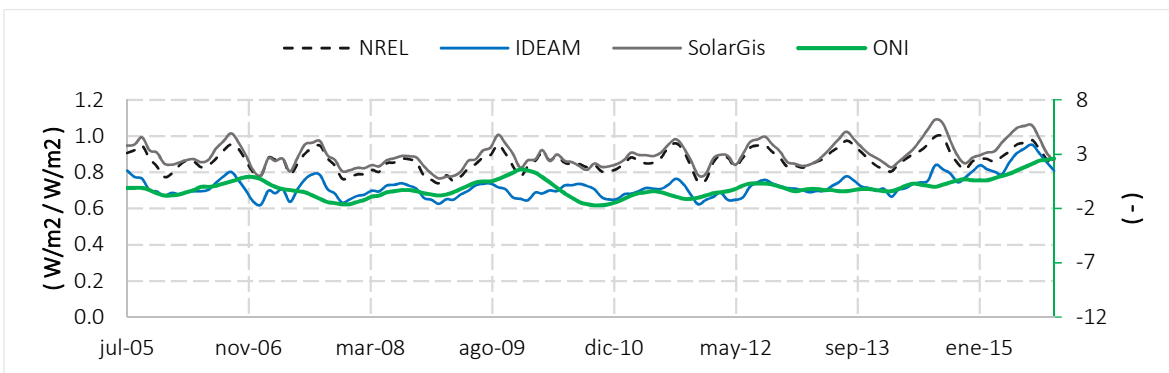


Figura 7. Comparación histórica para fuentes disponibles vs ONI, promedios trimestrales

Este tipo de análisis es recomendable para cualquier tipo de serie histórica con el fin de establecer su relevancia y la capacidad de capturar los fenómenos climáticos extremos que ocurren con una periodicidad mayor a las mediciones en sitio.

Para la aplicación de las metodologías MCP contempladas en este informe es necesario validar el ajuste existente entre la información secundaria y la información medida en sitio. Inicialmente se seleccionó un subintervalo de tiempo de la serie de IDEAM (OBJ) para el cual se tenga información de la base de datos secundaria. Con el fin de determinar el efecto de la longitud de la serie medida, se utilizaron diferentes

longitudes de la serie OBJ. Este intervalo representa los datos ‘medidos’ que van a ser utilizados para ajustar la serie de la fuente secundaria de referencia (REF).

La Figura 8 compara el comportamiento de un año de datos para una de las estaciones de medición IDEAM respecto al mismo año de datos obtenido de NREL, en esta última es claro que existe una sobre estimación en la serie (los valores se presentan en promedio diario). Sin embargo, la correlación entre las dos series de datos se hace evidente a través del coeficiente de determinación (R^2) y/o el coeficiente de correlación de Pearson (r) calculado entre las series, $R^2=0.86$ y $r= 0.93$ respectivamente. La Figura 9 por su parte muestra el ajuste lineal que da lugar al coeficiente de determinación para las series de datos. Es interesante la dispersión de los datos alrededor del modelo ajustado. Una vez establecida la existencia de correlación entre las series objetivo y referencia para el periodo común, las siguientes secciones muestran la aplicación de dos modelos MCP para el mismo punto de información. Es importante hacer énfasis en la selección del periodo de comparación y ajuste adecuado, de acuerdo con [30], es importante que el periodo de información medida en sitio corresponda a un año completo capturando el comportamiento estacional y adicionalmente cuente con al menos 95% de los datos.

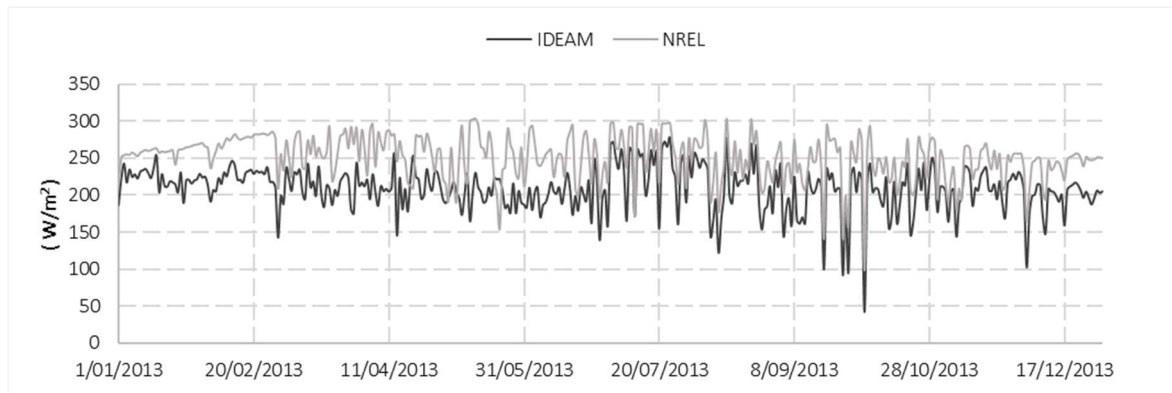


Figura 8. Comparación IDEAM vs NREL, tiempo común 2013

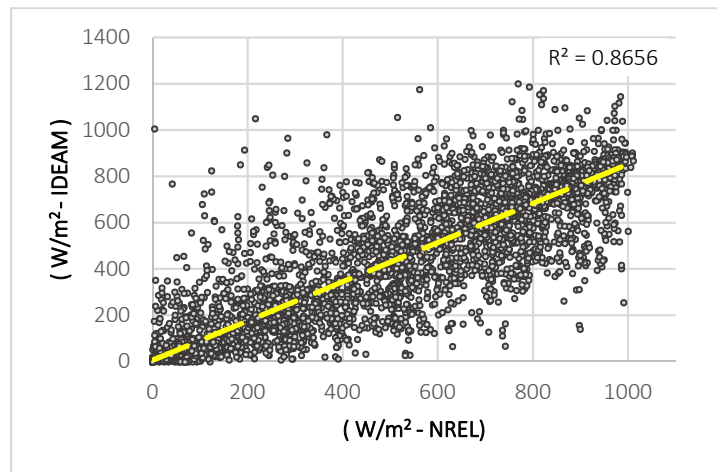


Figura 9. Coeficiente de determinación R^2 , tiempo común 2013

Para determinar la calidad de los modelos utilizados se emplean los indicadores de error comúnmente reportados en la literatura. Estos son error medio cuadrático normalizado (**RMSEn**), error de sesgo medio (**MBE**) y Kolmogorov-Smirnov Integral normalizado (**KSI%**), a continuación, se muestran sus respectivas fórmulas.

$$RMSEn = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{Mod})^2}}{X_{obs,max} - X_{obs,min}}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{Mod} - X_{obs})}{\sum_{i=1}^N X_{obs}}$$

$$KSI(\%) = \frac{KSI}{a_c} * 100$$

Donde

$$KSI = \int_{p_{min}}^{p_{max}} D_n dp$$

$$D_n = |F(p_i) - R(p_i)|$$

F Es la función de probabilidad acumulada de los datos medidos y R es la función de densidad acumulada para los datos estimados.

$$a_c = \frac{1.63}{\sqrt{N}} * (p_{max} - p_{min})$$

3.1.3. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE (LR)

El primer método de Medición-Correlación-Predicción (MCP) implementado se denomina regresión lineal simple (LR) y fue propuesto por Derrick en 1992 [32]. Este propone realizar una regresión lineal entre los datos del punto de referencia y el punto objetivo para el periodo de información común. A partir de dicha regresión es posible establecer una función cuya variable independiente es la información satelital de largo plazo (REF) y la variable dependiente corresponde a la información objetivo (OBJ) según la siguiente ecuación [27]:

$$y = mx + b$$

El ajuste de m y b puede realizarse de diversas formas, por practicidad se utilizó Excel para este fin, con un ajuste lineal de ambas series de datos.

A manera de ejemplo, se aplicó el modelo para uno de los puntos de información disponible, en este caso específico se obtuvo un Coeficiente de Pearson $r = 0.93$. La Figura 10 muestra el resultado de la regresión lineal realizada para la serie de referencia, a partir de la cual se reconstruyó la serie histórica (10 años) tomando como base información de NREL. La serie de largo plazo reconstruida se validó haciendo uso de la información obtenida de IDEAM para el mismo periodo de tiempo (2005-2015) de acuerdo con la **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

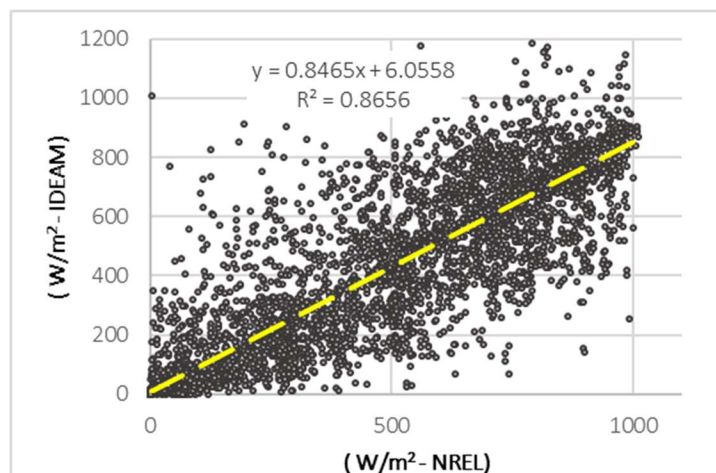


Figura 10. Regresión lineal ajustada para el tiempo común, 2013

A partir de la regresión lineal mostrada en la Figura 10 se obtiene la forma general de la corrección aplicada a la reconstrucción de la serie de largo plazo (ecuación reportada más adelante), el resultado se muestra en la Figura 11, en la que adicionalmente se compara la serie RL-1 con la serie original de IDEAM para todo el periodo de análisis. Es importante mencionar que el año seleccionado para realizar el ajuste de los datos fue 2013 y que los valores presentados a lo largo del documento están normalizados para el valor máximo de la serie de datos. En el momento de implementar este método es importante corregir las horas en las que la radiación no está presente ajustando los datos a cero.

$$GHI_{OBJ_i} = 0.8465 GHI_{REF_i} + 6.0558$$

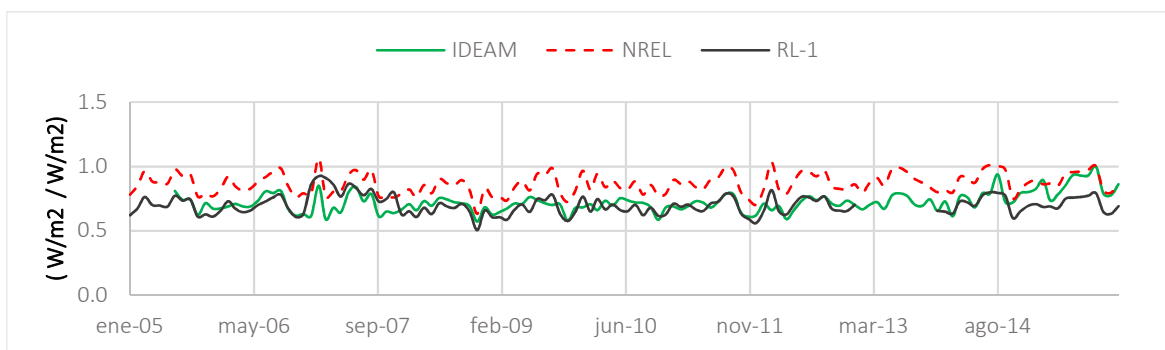


Figura 11. Reconstrucción serie histórica 10 años LR. Ajuste con 12 meses

En la Tabla 7 se muestran los indicadores de error para la serie de NREL para los ajustes realizados con diferente número de meses de la serie medida. En la Tabla 8 se muestran los mismos indicadores para la serie de SolarGis.

Tabla 7. Indicadores de error para reconstrucción. LR NREL

Indicador	Definición	NREL	1 mes	3 meses	6 meses	12 meses
RMSEn	Error cuadrático medio normalizado	11.00%	8.76%	8.77%	8.77%	8.77%
MBE	Error de sesgo medio	23.69%	-2.89%	-1.58%	-4.18%	-3.40%
KSI	Kolmogorov-Smirnov	25.43%	25.6%	24.36%	25.43%	25.34%

Tabla 8. Indicadores de error para reconstrucción. LR SolarGis

Indicador	Definición	SolarGis	1 mes	3 meses	6 meses	12 meses
RMSEn	Error cuadrático medio normalizado	15.76%	12.49%	12.49%	12.50%	12.51%
MBE	Error de sesgo medio	27.38%	-7.67%	-8.96%	-11.77%	-11.94%
KSI	Kolmogorov-Smirnov	33.51%	48.08%	48.18%	48.44%	47.81%

3.1.4. RELACIÓN DE VARIANZAS (VR)

Aunque los métodos que utilizan regresiones lineales tienen grandes ventajas asociadas a la facilidad de su implementación, ocasionan una reducción en la varianza de los valores pronosticados en un factor igual a r^2 si se compara con la varianza de los valores observados o medidos en sitio, esto podría incluir un sesgo en el pronóstico realizado [27]. El siguiente modelo propuesto se denomina *relación de varianzas* y utiliza una relación entre la varianza de ambas series de datos con lo que es posible ajustar un modelo lineal que mantiene la varianza de los datos observados o medidos en sitio [27] como se muestra a continuación.

La varianza $\sigma^2(\hat{y})$ para una serie de datos estimados a través de un modelo lineal de la forma $\hat{y} = mx + b$ se calcula como:

$$\sigma^2(\hat{y}) = \sigma^2(mx + b)$$

Aplicando la definición en cada término de la ecuación se tiene que:

$$\begin{aligned}\sigma^2(\hat{y}) &= \sigma^2(mx + b) \\ \sigma^2(mx) + \sigma^2(b) &= m^2\sigma^2(x)\end{aligned}$$

De esta forma al establecer m^2 como se muestra a continuación se garantiza que los valores estimados a través de dicho modelo lineal tendrán la misma varianza que los valores observados o medidos en sitio.

$$\begin{aligned}m^2 &= \frac{\sigma^2(\hat{y})}{\sigma^2(x)} \rightarrow \sigma^2(\hat{y}) = \sigma^2(y) \\ \sqrt{m^2} &= \sqrt{\frac{\sigma^2(\hat{y})}{\sigma^2(x)}}\end{aligned}$$

Finalmente se obtiene que,

$$\begin{aligned}m &= \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \\ \hat{y} &= \left[\mu_y - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \mu_x \right] + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) x \\ GHI_{OBJ\ i} &= \left[\overline{GHI}_{OBJ} - \left(\frac{\sigma_{OBJ}}{\sigma_{REF}} \right) \overline{GHI}_{REF} \right] + \left(\frac{\sigma_{OBJ}}{\sigma_{REF}} \right) GHI_{REF\ i}\end{aligned}$$

Donde:

GHI_{OBJ_i}	Irradiación global horizontal para el tiempo i en el punto objetivo (OBJ)
\overline{GHI}_{OBJ}	Irradiación global horizontal promedio del periodo de corto plazo medido en sitio objetivo (OBJ)
σ_{OBJ}	Desviación estándar calculada sobre la serie de corto plazo medida en el sitio objetivo (OBJ)
σ_{REF}	Desviación estándar de la serie de referencia (largo plazo) calculada para el periodo común entre las series de referencia (REF) y objetivo (OBJ)
\overline{GHI}_{REF}	Irradiación global horizontal promedio de la serie de referencia (largo plazo) calculada únicamente para el tiempo común entre las series de referencia (REF) y objetivo (OBJ)
GHI_{REF_i}	Irradiación global horizontal correspondiente al tiempo i en la serie de referencia o largo plazo

Para el caso de estudio utilizado anteriormente se calcularon los parámetros requeridos según la ecuación. Los resultados se reportan en la Tabla 9. Es importante mencionar que el coeficiente de correlación entre las series para el tiempo común sigue siendo el que se reportó en la definición del modelo LR ($r = 0.93$). Al igual que en el método anterior, en este caso es necesario corregir las horas en las que la radiación solar no está presente, ajustando los datos a cero.

$$GHI_{OBJ_i} = 0.9098GHI_{REF_i} - 9.1$$

Tabla 9. Parámetros VR, caso aplicado

Valor	1 mes		3 meses		6 meses		12 meses	
	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL
Media (\overline{GHI})	178.4	218.7	175.3	214.2	179.5	223.1	182	225
Desviación (σ)	253.1	304.3	256.1	297.2	257.1	302.7	259.6	304.7

Una vez se establece el modelo general es posible reconstruir la serie para el periodo de largo plazo requerido (10 años), al igual que en el caso anterior se evalúa el desempeño del modelo al comparar la serie reconstruida contra los valores de la base de datos IDEAM. El comportamiento del modelo aplicado a la serie de NREL se presenta en la Figura 12 y en la Tabla 10. Por su parte la evaluación de la aplicación del modelo esta vez para la serie de datos SolarGis se reporta en la

Tabla 11. Es posible apreciar la efectividad del método para reducir el Error de Sesgo Medio (MBE) de manera consistente.

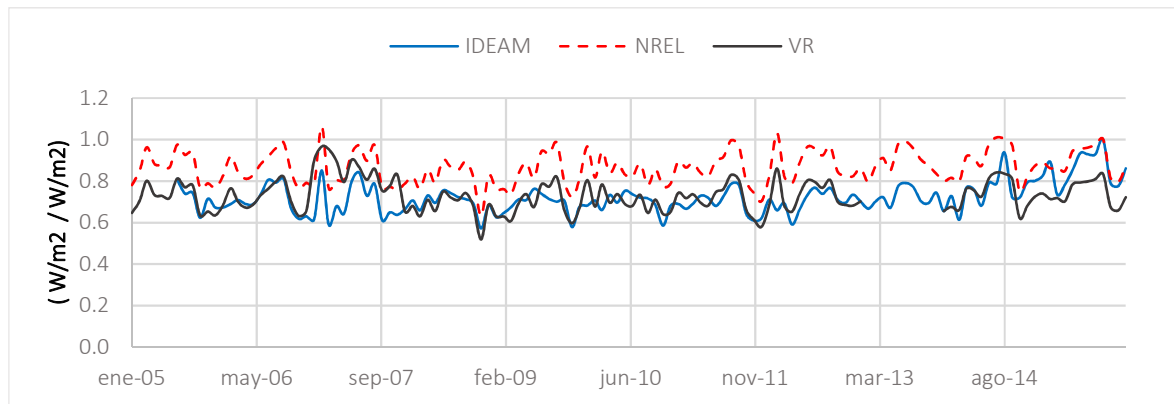


Figura 12. Reconstrucción serie histórica 10 años para VR. Ajuste con 12 meses

Tabla 10. Indicadores de error para reconstrucción. VR NREL

Indicador	Definición	NREL	1 mes	3 meses	6 meses	12 meses
RMSEn	Error cuadrático medio normalizado	11.00%	8.87%	9.00%	8.92%	8.94%
MBE	Error de sesgo medio	23.69%	3.44%	7.40%	4.19%	4.93%
KSI	Kolmogorov-Smirnov	25.43%	22.10%	22.21%	22.74%	22.66%

Tabla 11. Indicadores de error para reconstrucción. VR SolarGis

Indicador	Definición	SolarGis	1 mes	3 meses	6 meses	12 meses
RMSEn	Error cuadrático medio normalizado	15.76%	13.30%	13.47%	13.27%	13.22%
MBE	Error de sesgo medio	27.38%	10.06%	11.82%	6.05%	4.61%
KSI	Kolmogorov-Smirnov	33.51%	19.34%	20.57%	20.37%	20.40%

Como se ha mencionado anteriormente, el procedimiento descrito para LR y VR se aplicó y se evaluaron sus resultados para los puntos disponibles, información mostrada en la Sección 3.2.

Para temperatura no se muestra ningún ejercicio práctico debido a la calidad de los datos disponibles para la realización de este estudio. Sin embargo, esta metodología se ajusta también para las series de esta variable, la única diferencia notable con respecto a la radiación es que en este caso no es necesario corregir los valores correspondientes a radiación cero.

3.2. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

El procedimiento desarrollado en la sección anterior se replicó con la información proporcionada para las ubicaciones restantes reportadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para cada una se calcularon los evaluadores de error mostrados en la

Tabla 11 con la intención de validar los métodos descritos y seleccionar aquel con mejores resultados generales. De forma similar al caso anterior se hicieron sensibilidades sobre la cantidad de información disponible para realizar el ajuste de los diferentes modelos lineales.

3.2.1. Las Flores – Barranquilla

Para esta ubicación se utilizó 2013 como periodo común para el ajuste de las dos metodologías MCP, LR y VR.

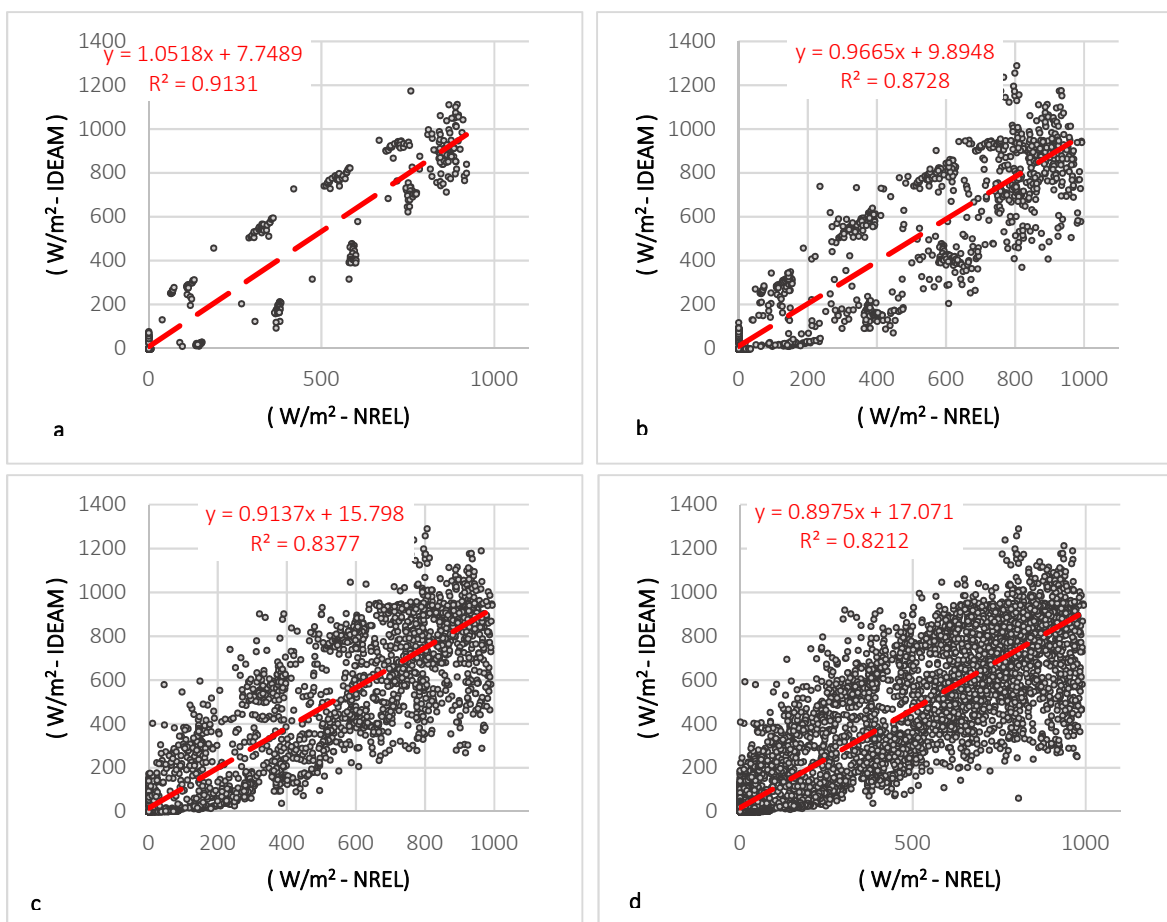


Figura 13. Ajuste lineal para Las Flores, a) ajuste con 3 meses de datos; b) ajuste con 6 meses de datos; c) ajuste con 9 meses de datos y d) ajuste con 12 meses de datos

Tabla 12. Parámetros VR para Las Flores, sensibilidad de 4 niveles

	1 mes		3 meses		6 meses		12 meses	
Valor	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL	IDEAM	NREL
Media	275,62	254,68	262,25	261,11	249,88	256,18	238,52	246,73
Desviación	366,72	333,16	353,43	341,65	332,80	333,35	321,67	333,16

A partir de los dos métodos mostrados anteriormente se reconstruyeron las series para 10 años (2005 – 2015). Los indicadores de error se calcularon utilizando los segmentos anuales de las series de IDEAM que contenían menor cantidad de vacíos.

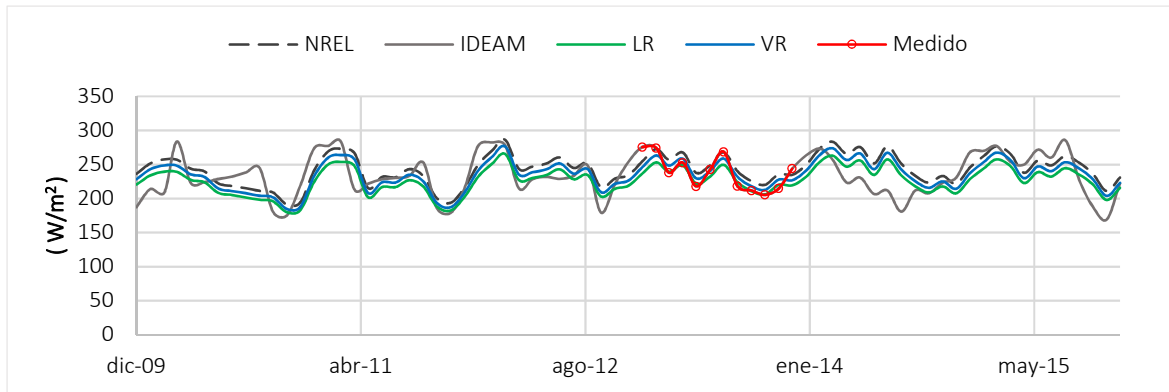


Figura 14. Resultado de la reconstrucción para la estación de Barranquilla.

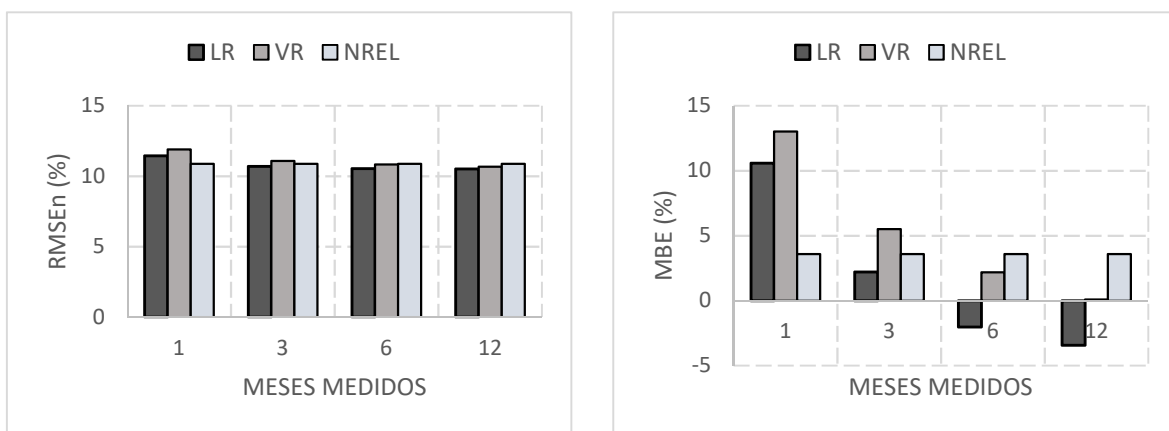


Figura 15. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

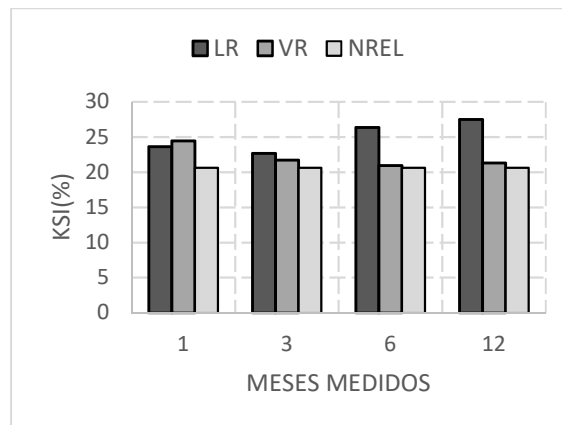


Figura 16. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

Como se puede observar a partir de las figuras mostradas anteriormente, el método de VR disminuye el error de sesgo medio por debajo del 2 % para datos medidos por un 1 año, por lo que este método cumple con el objetivo. Para el KSI% se puede observar que, si bien el valor obtenido con la serie original de NREL es menor,

al aplicar el método de ajuste VR este valor no se ve afectado de manera significativa. Es decir, las distribuciones de probabilidad de ocurrencia de los valores de radiación son similares.

3.2.2. Univalle - Cali

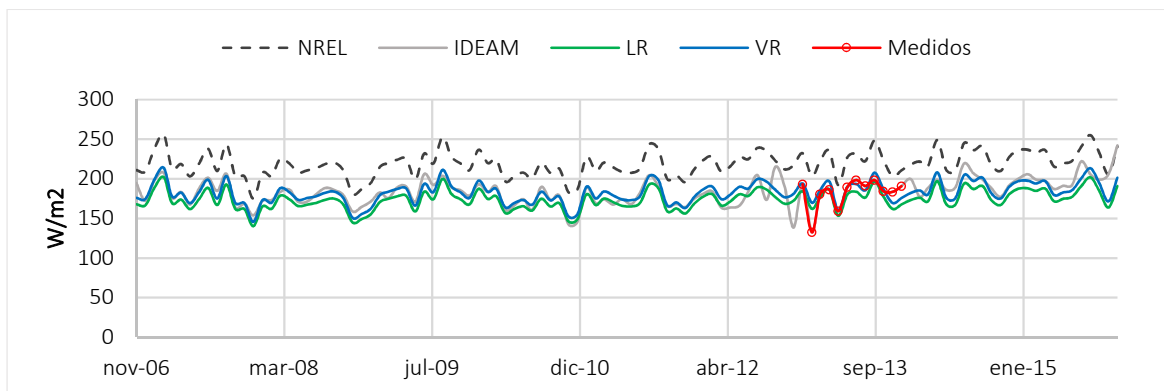


Figura 17. Resultado de la reconstrucción para la estación de Cali

En este caso se utilizó el año 2011 para realizar la comparación con la serie reconstruida. Los resultados de los indicadores se muestran en la Figura 18.

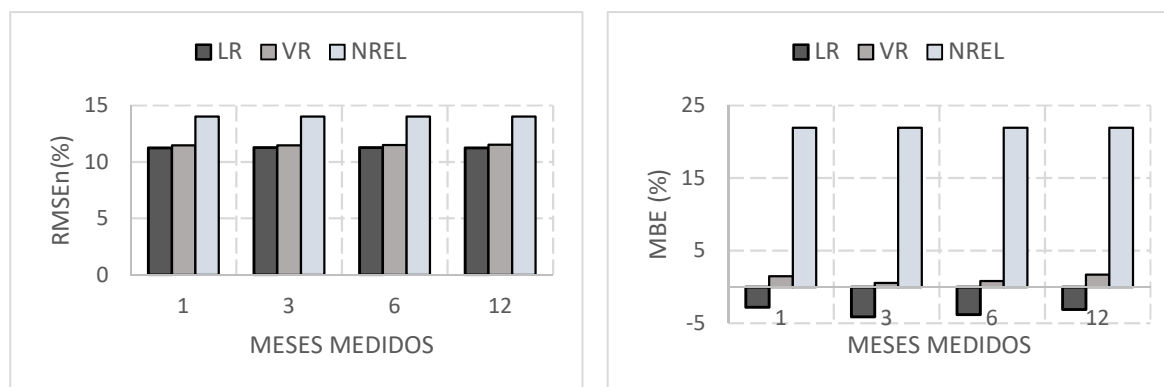


Figura 18. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

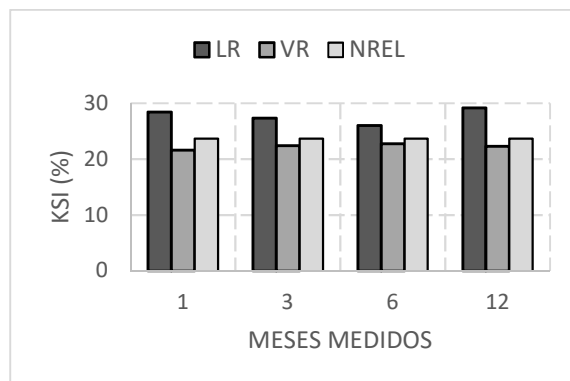


Figura 19. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

El comportamiento para esta ubicación demuestra correctamente el funcionamiento del método de VR porque reduce el sesgo a menos de 2% y también cambia el RMSEn, mejorando este valor con respecto a la serie de NREL original. Finalmente se puede observar que en cuanto al comportamiento del KSI%, también tuvo un menor porcentaje, lo que quiere decir que la serie reconstruida con el método de VR se comporta mejor que la serie original, y se ajusta mejor a los datos medidos reportados por IDEAM.

3.2.3. Carmen de Bolívar

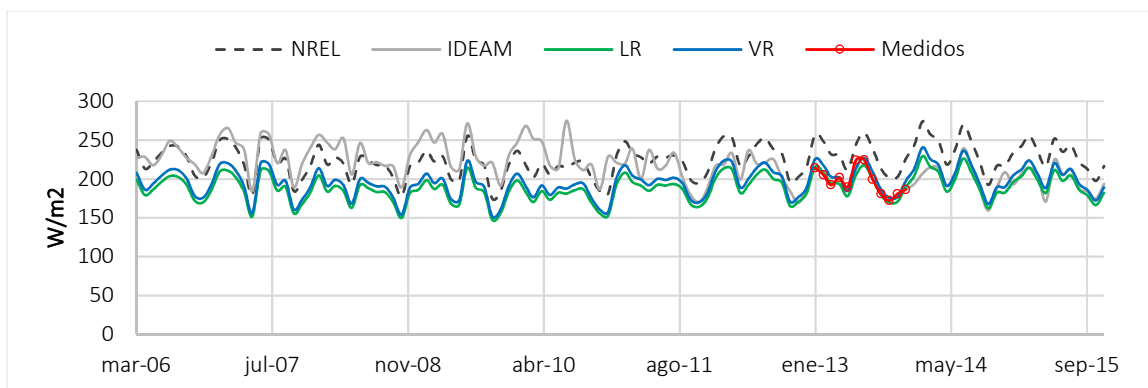


Figura 20. Resultado de la reconstrucción para la estación de Carmen de Bolívar.

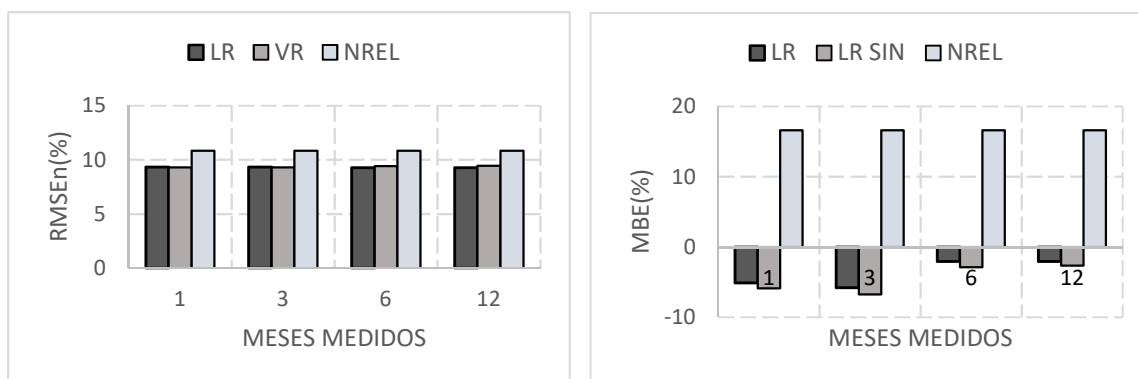


Figura 21. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

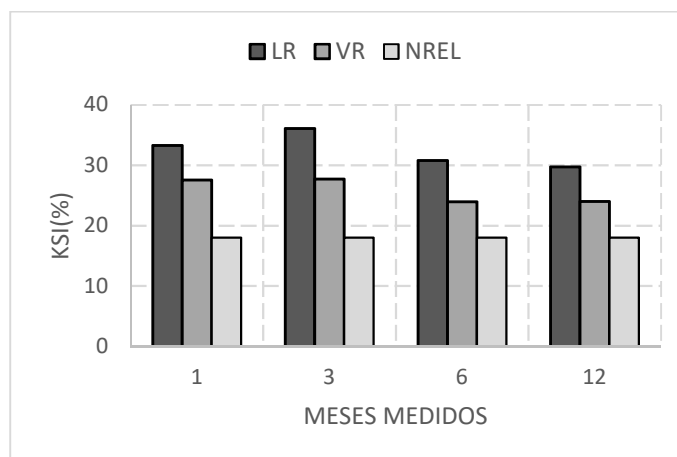


Figura 22. KSI (%) vs Cantidad de Meses medidos.

Para esta ubicación se puede observar que el método VR reduce el RMSEn y el MBE hasta valores por debajo de 10% y 2%, respectivamente. Sin embargo, el KSI% se mantuvo mejor para la serie original por una diferencia del 6% con respecto a los datos reconstruidos con el método de VR. Cabe resaltar que este método no busca ajustar el KSI%, este método se enfoca en reducir el error del sesgo entre las dos series.

3.2.4. Metro Medellín – Medellín

Para esta ubicación se contó con datos de SOLARGIS, se realizó el mismo análisis que para las otras estaciones.

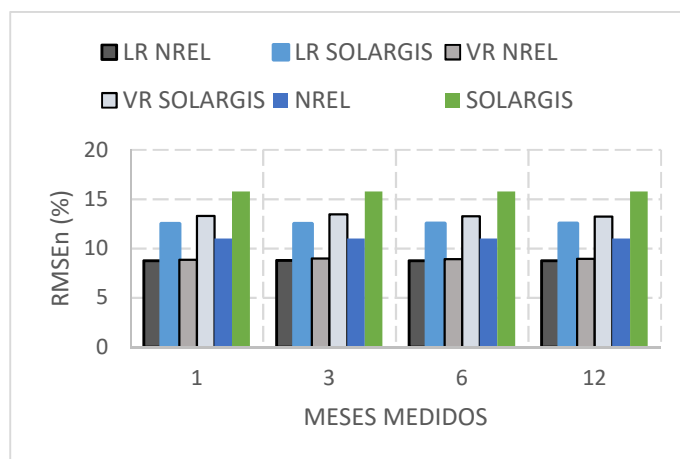


Figura 23. RMSE vs Cantidad de Meses Medidos

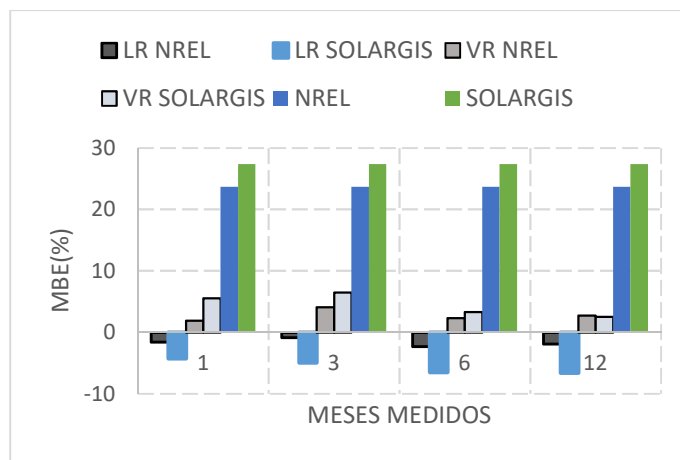


Figura 24. MBE vs Cantidad de Meses Medidos

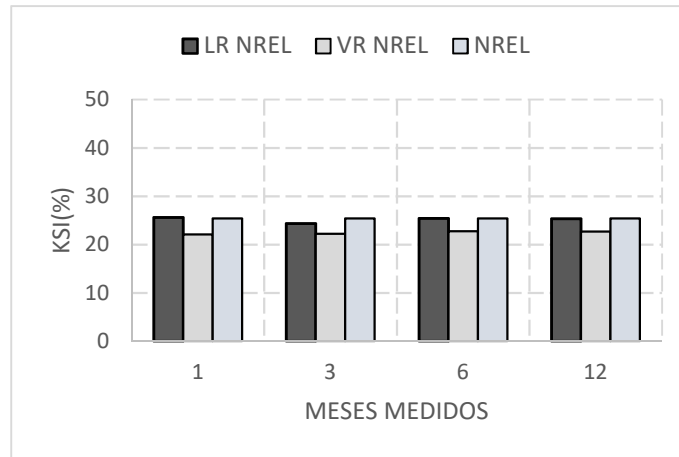


Figura 25. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

En este caso nuevamente el método de VR corrigió mejor los datos con respecto a los datos proporcionados por IDEAM, reduciendo los dos primeros indicadores y mejoró el comportamiento de la serie, ya que su KSI% es menor que el valor de NREL original.

3.2.5. UTM – Santa Marta

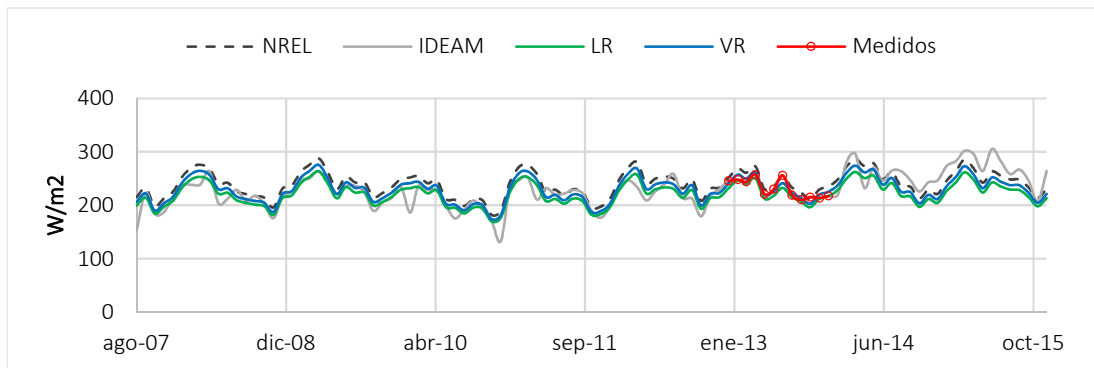


Figura 26. Resultado de la reconstrucción para la estación de Santa Marta

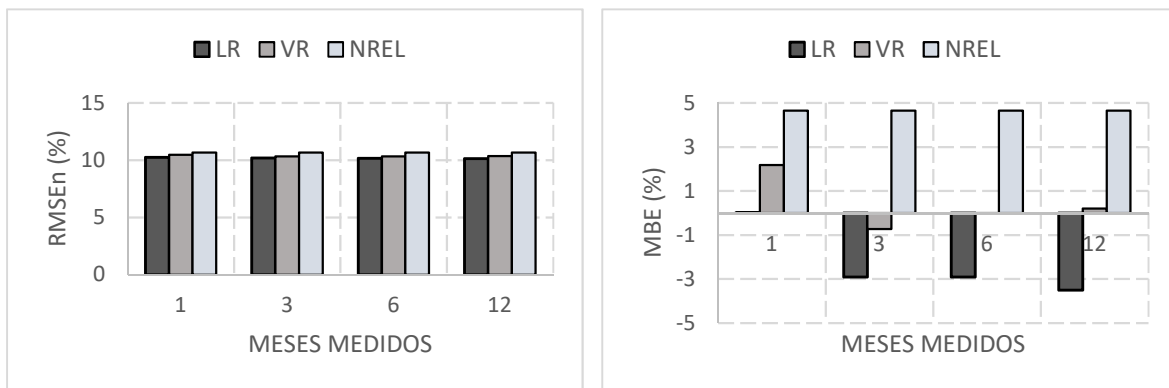


Figura 27. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

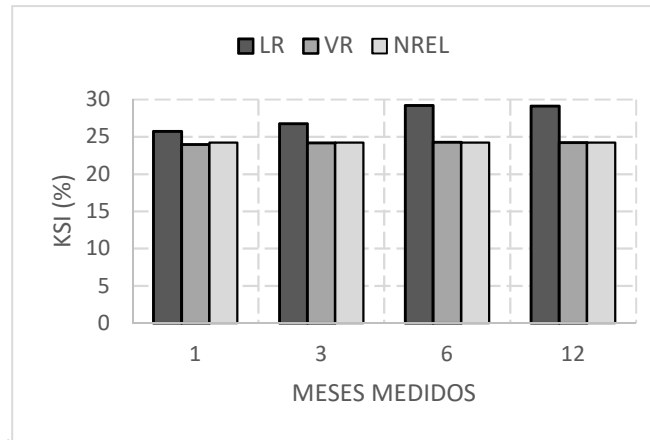


Figura 28. KSI (%) vs Cantidad de Datos Medidos

3.2.6. San Marcos – Sucre

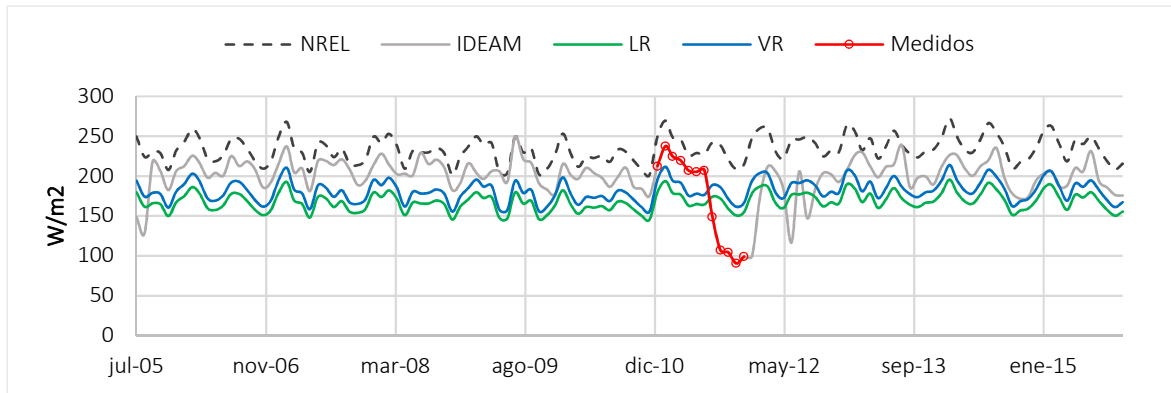


Figura 29. Resultado de la reconstrucción para la estación de Sucre

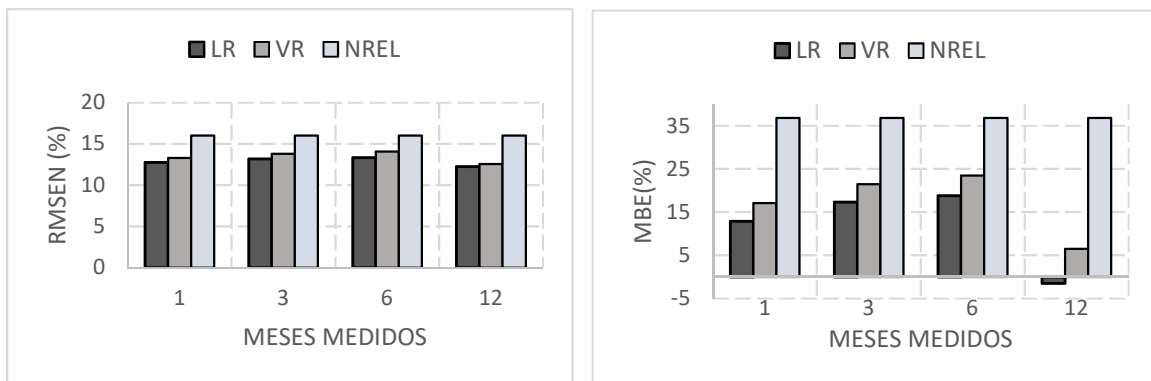


Figura 30. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

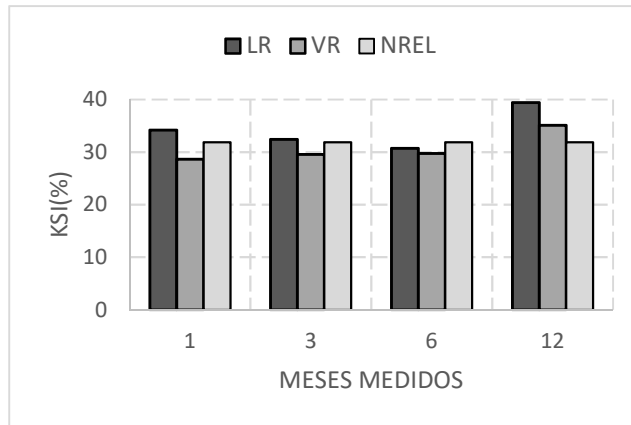


Figura 31. KSI (%) vs Cantidad de Datos Medidos

En esta ubicación en especial el método LR logra disminuir el MBE mejor que el método VR, sin embargo, de acuerdo con el comportamiento presentado en las otras ubicaciones, el método de VR es el recomendado junto con datos medidos de buena calidad. Si bien ambos modelos logran reducir el error de sesgo, este punto en especial muestra que problemas en la medición conducen a errores de sesgo indeseables. En la Figura 28 es evidente que el periodo utilizado para ajustar el modelo, serie roja, tiene un comportamiento anormal respecto a la tendencia general posiblemente ocasionado por fallas en las mediciones. Ya que el periodo común en la serie de datos de corto plazo se comporta como una temporada de radiación inferior al promedio, el ajuste final del modelo induce un error de sesgo que subestima el comportamiento real de la serie (líneas verde y azul de la Figura 28).

3.2.7. Uribia – La Guajira

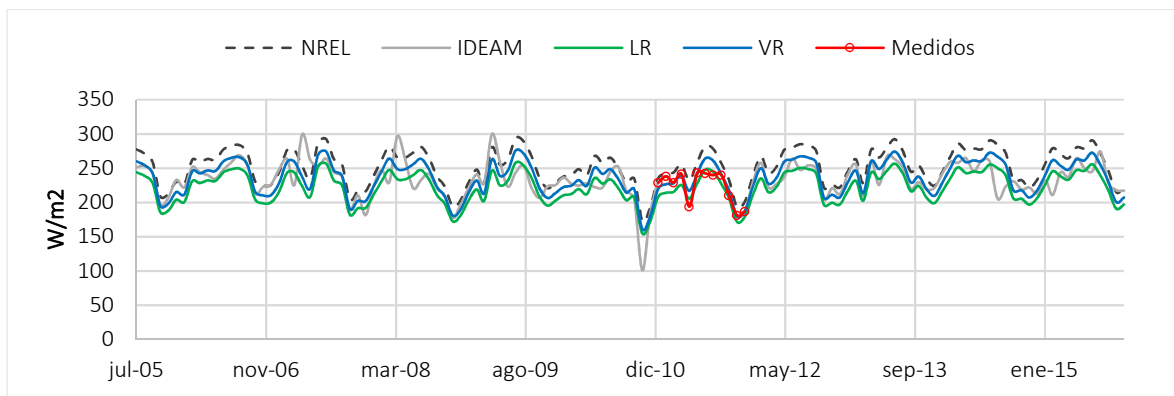


Figura 32. Resultado de la reconstrucción para la estación de La Guajira

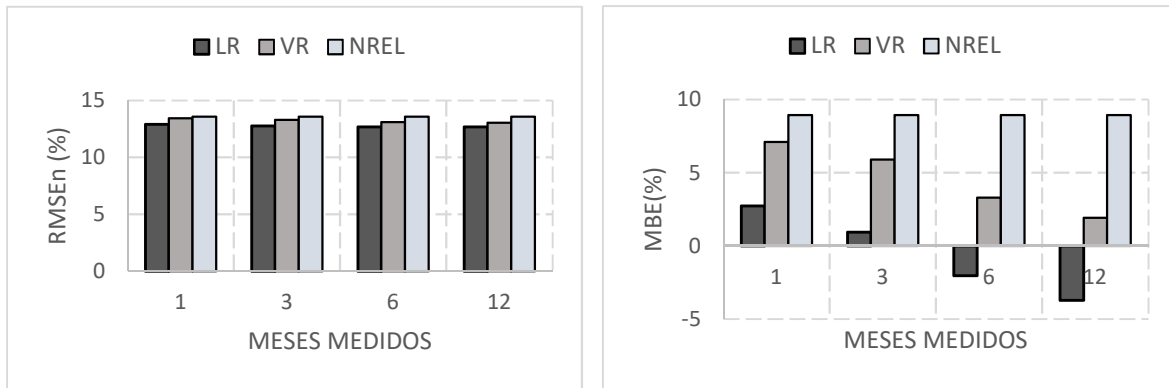


Figura 33. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

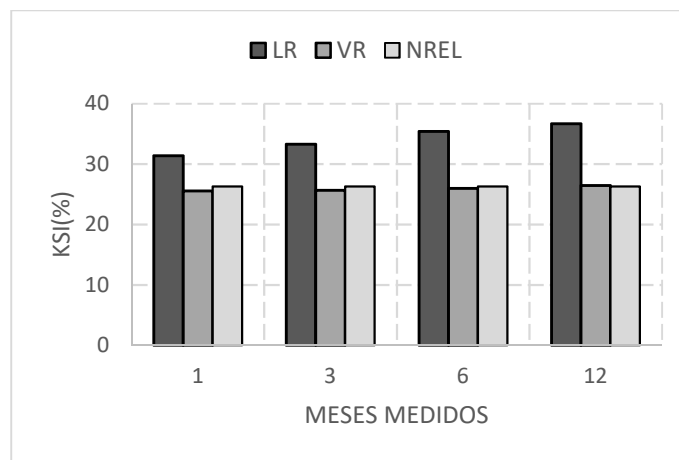


Figura 34. KSI (%) vs Cantidad de Datos Medidos.

Para esta ubicación también se puede observar una disminución en los dos primeros indicadores y un comportamiento similar en el tercer indicador, nuevamente VR presenta el mejor resultado, aunque se resalta la importancia de tener datos medidos de buena calidad ya que este método depende de esos resultados.

3.2.8. Fedearroz – Valledupar

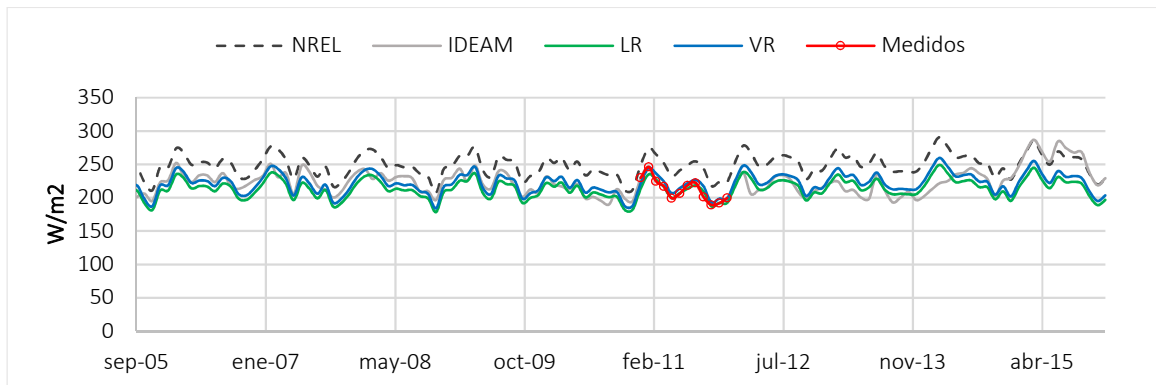


Figura 35. Resultado de la reconstrucción para la estación de Valledupar.

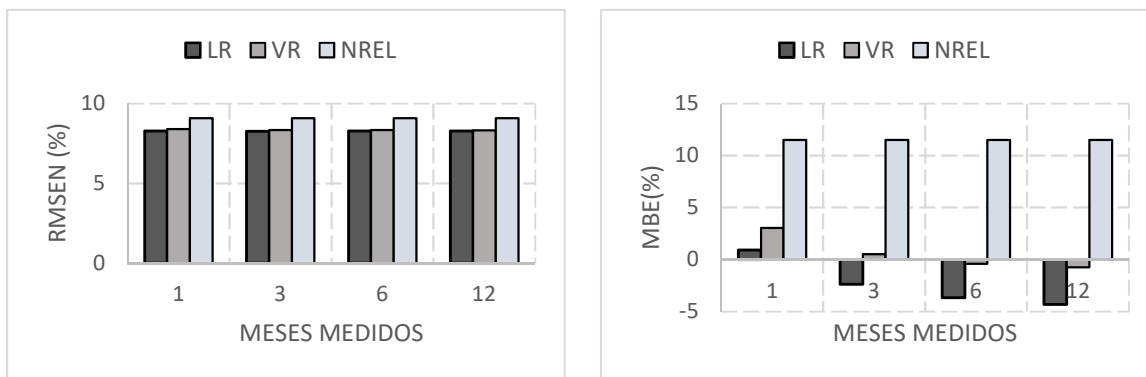


Figura 36. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

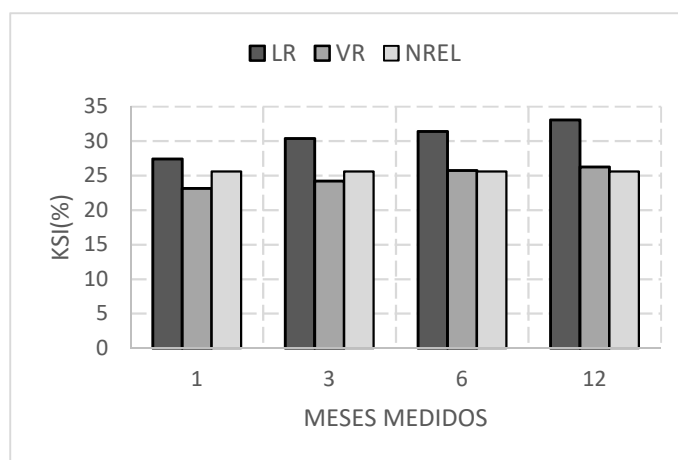


Figura 37. KSI (%) vs Cantidad de datos medidos

De acuerdo con los resultados presentados se puede ver el método de ajuste MCP basado en la relación de varianzas es el más efectivo para reducir error de sesgo (MBE). En todos los casos para un tiempo común de 12 meses se logró un error de sesgo dentro del rango $\pm 5\%$ y en la mayoría de los casos por debajo del 2%. Esto coincide con lo reportado en la literatura y es independiente de la serie de datos de referencia utilizada (NREL o SolarGis). El método de ajuste no tiene un efecto adverso sobre el indicador KSI. El error cuadrático medio RMSE es insensible a la metodología.

Es importante notar que cuando se utilizan series de tiempo medidas (OBJ) de menor duración 1, 3 o 6 meses la corrección en el sesgo es menor que cuando se cuenta con un año completo. Aunque existen algunas excepciones a esta observación, es importante notar que un tiempo mínimo de medición de un año evita que se incurra en problemas en los ajustes. Los errores de sesgo están relacionados con condiciones atmosféricas, tales como la presencia de aerosoles. Estos pueden tener un componente estacional. Para poder capturar de manera completa estos efectos estacionales se debe contar, como mínimo, con un año de medición en el sitio.

3.3. EFECTOS DE LA CORRECCIÓN SOBRE EL CÁLCULO DE LA ENFICC

En la sección anterior se demostró que el método de ajuste propuesto, basado en el método MCP, es efectivo en reducir el error de sesgo. La pregunta que resta es cuál es el efecto sobre el cálculo de la ENFICC. Con este

propósito se calcula la ENFICC con base a las diferentes series de tiempo disponibles (IDEAM, NREL, SOLARGIS) y las correspondientes series corregidas con la metodología propuesta.

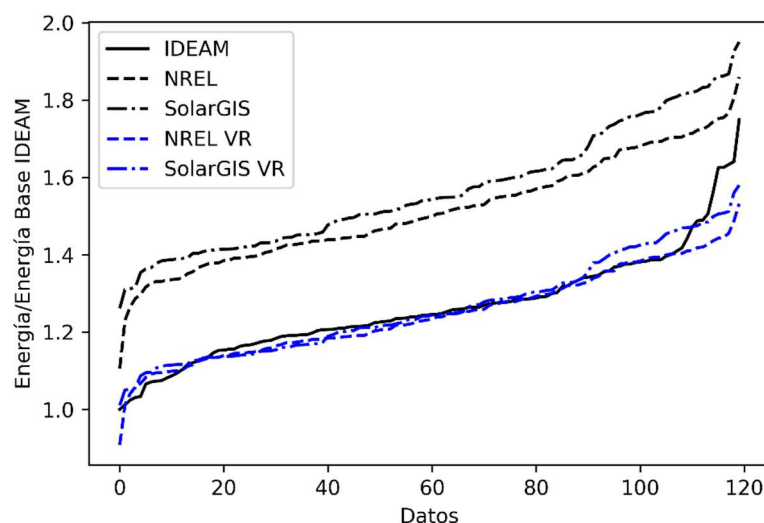


Figura 38 - Distribución de la energía diaria promedio calculada a partir de las series de 10 años con resolución horaria.

La Figura 38 muestra la distribución de la energía diaria promedio calculada a partir de las series de 10 años con resolución horaria para la estación “Metro de Medellín”, las series se encuentran normalizadas con respecto al valor mínimo de las series de IDEAM. Es claro que las dos series de información con base a datos satelitales (NREL y SolarGIS) sobre estiman la distribución de energía. En el caso de la ENFICC Base, la base de datos de NREL la sobreestima en un 24% mientras la de SolarGIS en un 28%. Se observa que el método de ajuste propuesto es capaz de reducir el sesgo, ajustar de manera correcta la distribución medida en tierra y reducir el error en el cálculo de la ENFICC, en este caso a 2% para ambas bases de datos. La Tabla 13 muestra un resumen de los resultados obtenidos y demuestra la efectividad del método propuesto para la reducción del error en el cálculo de la ENFICC.

Tabla 13. ENFICC Base calculada a partir de las series de tiempo estudiadas. Todos los datos están normalizados con base al valor de IDEAM.

UBICACIÓN	SERIE DE DATOS				
	IDEAM	NREL	SOLARGIS	VR	VR_SOL
CALI	1.00	1.22		1.02	
MEDELLÍN	1.00	1.24	1.28	1.02	1.02
SANTA MARTA	1.00	1.11		1.00	
URIBIA	1.00	1.08		0.99	
VALLEDUPAR	1.00	1.14		1.00	

4. PROTOCOLO PARA LA VERIFICACION Y MEDICIÓN DE SERIES HISTÓRICAS

Con base a lo presentado en este documento, a continuación, se plantea el protocolo con los requerimientos mínimos para realizar una campaña de medición de irradiación solar horizontal y temperatura ambiente, así como la metodología para la verificación, construcción y ajuste de series de tiempo para las mismas variables.

4.1. Requisitos mínimos para la medición de irradiación solar y temperatura ambiente

4.1.1. Medición

La selección, instalación, puesta en servicio, operación y calibración de los instrumentos para la medición de las variables meteorológicas está detallada en el documento de la WMO – Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación (Edición 2014) [9] o versiones posteriores. Adicionalmente varias normas internacionales (ISO 9060, IEC 61724-1) estandarizan los procedimientos para la medición de dichas variables. A continuación, se presentan los *requerimientos mínimos* para la medición de la Irradiación Horizontal Global (GHI) y Temperatura Ambiente (TA), haciendo énfasis en que es necesario seguir las normas y recomendaciones establecidas para cada variable, así como las instrucciones de los *fabricantes de los equipos de medición* en los manuales de operación.

Para la medición de la GHI se debe utilizar un piranómetro de *Primera Clase* o estándar superior según la clasificación en la norma ISO 9060 (o de *Buena Calidad* o superior según la guía de la WMO [9]). Se debe seguir un procedimiento de verificación y puesta en servicio tras la correcta instalación del instrumento, siguiendo las instrucciones de los fabricantes de los equipos.

La instalación del piranómetro se basa en las recomendaciones de la sección 7.3.3 de la guía de la WMO [9]. De manera general el instrumento se ubica de manera segura y debidamente nivelado. En lo posible no debe haber obstáculos por encima del plano de detección dentro del rango azimutal de salida y puesta del sol durante todo el año. En los lugares donde no es posible evitar obstrucciones, los detalles completos del horizonte y las obstrucciones deben incluirse en la descripción de la estación para facilitar una evaluación subsiguiente de su impacto. Los piranómetros son sensibles a la temperatura de manera que éste no debe ser ubicado en contacto directo con la placa horizontal que lo sostiene, para esto es común utilizar una conexión con tornillos desde la placa hasta la parte inferior del instrumento. En cualquier caso, la instalación debe estar de acuerdo con lo establecido en el manual del usuario del instrumento.

Para la medición de la temperatura ambiente se deben utilizar termómetros eléctricos, por ejemplo, de resistencias eléctricas, termistores o termopares. La instalación, calibración o verificación y mantenimiento se debe realizar de acuerdo con lo establecido en el manual del usuario del instrumento; los reportes de calibración o verificación y mantenimiento deben estar disponibles para revisión por parte del dictaminador técnico.

El termómetro debe estar instalado en una garita de estación meteorológica (o similar), protegiéndolo de la radiación directa para evitar el fenómeno de auto calentamiento. Tanto el piranómetro como el termómetro deben estar instalados a una altura entre mínima de 1.5 metros sobre el suelo.

La operación y mantenimiento de los piranómetros y termómetros se debe realizar siguiendo lo establecido por el fabricante, incluyendo actividades de limpieza, mantenimiento, verificación y recalibraciones, en los manuales de uso. También la guía de la WMO [9] en la sección 7.3.3.5 contiene recomendaciones al respecto.

Generalmente se tienen tareas específicas diarias, mensuales y anuales. Debe existir un registro de las actividades de mantenimiento y limpieza de los instrumentos.

La calibración del instrumento (o comparación con un patrón aceptado para dicha aplicación) debe comprobarse como mínimo cada año (ver la guía de la WMO [9] en la sección 7.3.1) o *según la recomendación del fabricante*. Esta verificación puede hacerse mediante diversos métodos, incluyendo comparación entre diferentes mediciones en el sitio o comparación con otro patrón calibrado.

Con el fin de verificar la calidad de los datos e identificar posibles sesgos debido a contaminación o daño de un instrumento, es **recomendable** el uso de instrumentación redundante con su propio *datalogger* para evitar un punto de falla centralizado que pueda causar pérdida de información de acuerdo con la norma IEC 61724-1 vigente. Además, la instrumentación redundante ayuda a minimizar la pérdida de datos causada por eventos fortuitos. Se entiende por mediciones o información redundante aquella obtenida por un segundo sistema de medición (Irradiación Horizontal Global y temperatura ambiente) independiente localizado en el área de desarrollo del proyecto o mediciones indirectas. Por ejemplo, es posible calcular la GHI a partir de la medición de irradiación directa y difusa. Este tipo de mediciones son efectivas para realizar controles de calidad o **completar información faltante**.

Se debe contar con un registro de las actividades de limpieza y mantenimiento de los equipos de medición según lo establecido en los manuales de operación de los instrumentos o lo establecido en la guía de la WMO [9]. Estas deben incluir actividades de limpieza, mantenimiento y revisión general de los sistemas de medición y adquisición de datos.

La frecuencia de muestreo se configura dependiendo del tiempo de respuesta del instrumento y las características del *datalogger*. El sistema de adquisición debe estar configurado para almacenar información como mínimo cada diez (10) minutos, incluyendo información sobre el número de datos utilizados para el cálculo de la media, así como la desviación estándar. Se debe realizar algún tipo de control de calidad de los datos obtenidos. Estos pueden incluir controles automáticos y visuales. Los datos que no pasen los controles de calidad deben ser separados y analizados en detalle, los que pasan los controles de calidad son agregados y archivados en **resolución horaria como mínimo**. El dato correspondiente a una franja horaria dada, por ejemplo, las 6:00, debe corresponder al valor medio de los datos tomados entre las 6:00 y las 6:59 **hora local colombiana**.

4.1.2. Llenado de datos

Una campaña de medición de datos meteorológicos en sitio, con los requerimientos de calidad establecidos para la correcta planeación de un proyecto energético, requiere de monitoreo y controles continuos. Pese a la aplicación de las mejores prácticas, siempre es posible que las mediciones se vean interrumpidas por imprevistos tales como daños, desconexiones y otras circunstancias fortuitas. Las mediciones complementarias (ya sea por instrumentación redundante como fue descrito en la Sección 4.1.1 o de estaciones cercanas con la misma orografía según criterio del dictaminador técnico) pueden ser usadas para llenar datos faltantes de la instrumentación principal.

De no contar con información redundante, se hace necesario llenar datos faltantes mediante alguna técnica estadística que permita capturar el comportamiento de la variable a medir durante el tiempo faltante. Es de anotar que cualquier método de llenado se basa en el comportamiento y tendencia de los datos existentes y por ende sería imposible predecir comportamientos anómalos que pudiesen ocurrir durante el periodo faltante.

En la literatura existen varias metodologías para el llenado de datos faltantes. Desde metodologías basadas en simples interpolaciones, hasta la aplicación de descomposición espectral han sido desarrolladas para diferentes

aplicaciones con diferentes niveles de complejidad. El propósito de esta sección es establecer una metodología sencilla, capaz de llenar datos faltantes de las mediciones en sitio, manteniendo las tendencias observadas a partir de las mediciones. Es importante mencionar que esta metodología se propone suponiendo que se cuenta con el requerimiento mínimo de un año de medición. De contar con más tiempo de medición, se podría recurrir a metodologías más sofisticadas.

La metodología para el llenado de datos se desarrolla bajo la suposición de que los datos de una misma franja horaria están distribuidos de manera normal. Los parámetros del modelo de distribución normal se calculan a partir de los datos correspondientes a la misma franja horaria del dato o datos faltantes en periodos alrededor del periodo faltante.

Se seleccionan periodos de la misma duración de los datos faltantes anterior y posterior al período vacío para no generar sesgos. La Figura 39 muestra de manera esquemática la estructura de la metodología. Los datos se toman en la misma franja horaria del dato faltante.

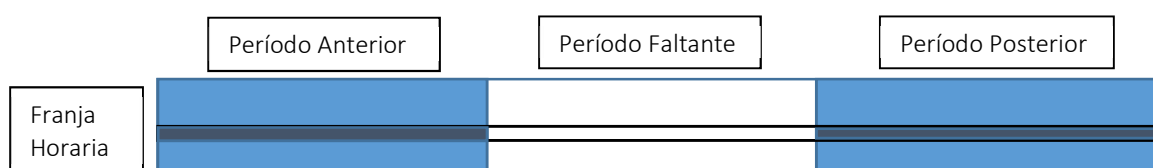


Figura 39. Esquemático para la selección de periodos y franjas horarias para llenado de datos faltantes.

El procedimiento concreto se desarrolla así:

2. Identificar los periodos con datos faltantes y dividir en dos grupos según sus franjas horarias:
 - a. De las 20:00 – 4:00: No existe radiación por lo tanto los vacíos que existan en este grupo toman el valor de 0.
 - b. De 5:00 – 19:00: Para este grupo de datos se procede de la siguiente manera:
 - i. Se toman los datos de los periodos anterior y posterior correspondientes a la misma franja horaria de los datos faltantes. Los periodos anterior y posterior tienen la misma longitud del periodo faltante.
 - ii. Se calcula la media y desviación estándar de los datos de los periodos anterior y posterior.
 - iii. Se seleccionan de manera aleatoria valores de radiación a partir de una distribución normal con media y desviación estándar igual a la calculada en el paso anterior para llenar los datos faltantes.

Para el llenado de datos de temperatura, se sigue el mismo procedimiento con la única diferencia de que no existen franjas donde la temperatura sea cero (0), por lo tanto, se sigue el procedimiento para datos en todas las franjas horarias.

El procedimiento establecido en esta sección permite llenar con datos que siguen las tendencias establecidas en los periodos adyacentes, pero de ninguna manera permitiría predecir comportamientos diferentes o anómalos que pudieran haber ocurrido durante el periodo con datos faltantes. El cálculo de la ENFICC requiere de una caracterización de la disponibilidad del recurso promediado mensualmente. Debido a esto, es importante contar con suficientes datos que permitan, de manera razonable, estimar la disponibilidad durante un mes dado. Por esta razón series de tiempo con el requerimiento mínimo de un año de duración, medidas en sitio, con datos faltantes por más de **dos semanas consecutivas o en total con más del 5%** de datos faltantes no son aceptables ya que conducirían a sesgos y malas estimaciones de las condiciones meteorológicas en la zona. Si se aporta información superior o igual a cinco (5) años de mediciones en sitio se admitirán vacíos de

hasta cuatro (4) semanas consecutivas en resolución horaria, en este caso el llenado de datos deberá realizarse con un modelo autoregresivo y ser avalado por el dictaminador técnico.

4.2. Metodología para la verificación y ajuste de series de tiempo

El punto de partida para la metodología de verificación y ajuste de las series de tiempo son: i) información de referencia (REF) de largo plazo (mayor o igual a 10 años) de fuentes secundarias basadas en información satelital, e ii) información de corto plazo medida adecuadamente en el punto objetivo (OBJ) por al menos un año consecutivo como se estableció en la Sección 4.1. La información de referencia y la información medida en el punto objetivo deben contar con al menos un año de datos simultáneos (“*overlap*”) con los que se evaluará el modelo de ajuste.

1. Las recomendaciones y estándares internacionales [5, 2], establecen que las series de tiempo históricas de GHI y Temperatura Ambiente para la planeación y financiación de proyectos solares de mediano o gran tamaño deben tener una resolución **espacial de 10 km y frecuencia horaria**. Con el fin de satisfacer este requerimiento, la información satelital debe ser adquirida para el punto exacto del proyecto y la fuente debe satisfacer estas condiciones de resolución espacial y temporal.
2. Para la verificación de las series de datos satelitales de GHI y temperatura ambiente, se debe realizar un proceso básico de comparación de esta serie con los datos medidos en tierra para el periodo de tiempo correspondiente a la campaña de medición. Para esto se realiza un análisis de correlación. Las series utilizadas, en resolución horaria, deberán tener un valor para el coeficiente de correlación de Pearson $r \geq 0.9$ equivalente a un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.81$ (regresión lineal simple) para las series de GHI y un valor para el coeficiente de correlación de Pearson $r \geq 0.8367$ equivalente a un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.7$ (regresión lineal simple) para las series de TA. El anterior análisis garantiza que el modelo satelital esté capturando de manera razonable las condiciones meteorológicas en tierra. Se aclara que una vez se realice un análisis detallado de la temperatura ambiente, este valor de correlación y determinación se podrá ajustar para la temperatura ambiente.
3. Una vez se determina la correlación de los datos se debe aplicar el método Medición-Correlación-Predicción (MCP) basado en la relación de las varianzas presentado en la sección 4.1.5. En este documento se demostró que el método MCP es efectivo para la reducción del error de sesgo en el cálculo de la ENFICC y la adaptación de los datos a las condiciones en tierra.
4. El algoritmo para la verificación de las series de datos, así como la reconstrucción mediante el método MCP se presenta en la Figura 40. Este algoritmo se encuentra automatizado en un aplicativo implementado en una **macro de Microsoft Excel** y que hace parte integral del Protocolo. El procedimiento automatiza el cálculo de la correlación entre las series de datos medidas y de la base de datos satelital y la reconstrucción de la serie de tiempo histórica de por lo menos 10 años adaptada a las condiciones reales en tierra.
5. El resultado del ejercicio de verificación y reconstrucción son las series de tiempo de Temperatura Ambiente y GHI, esta es la información que debe ser incluida en los formatos 24.1 y 24.2 de la resolución CREG 201 de 2017, respectivamente.

Algorithm 1: Metodología para reconstrucción de series históricas

Definición de variables

GHI_{obj_i} : Irradiancia global horizontal para el tiempo i en el punto objetivo (obj)
 \overline{GHI}_{obj} : Irradiancia global horizontal promedio del periodo de corto plazo medido en sitio (obj)
 GHI_{ref_i} : Irradiancia global horizontal correspondiente al tiempo i en la serie de referencia o largo plazo (ref)
 \overline{GHI}_{ref} : Irradiancia global horizontal promedio de la serie de referencia o largo plazo calculada únicamente para el tiempo común entre las series de referencia (ref) y objetivo (obj)
 σ_{obj} : Desviación estándar calculada para la serie de corto plazo medida en el sitio objetivo (obj)
 σ_{obj} : Desviación estándar de la serie de referencia o largo plazo calculada para el periodo común entre las series de referencia (ref) y objetivo (obj)
 GHI_{obj_j} : Irradiancia global horizontal para el tiempo j en el punto objetivo (obj), periodo reconstruido
 GHI_{ref_j} : Irradiancia global horizontal correspondiente al tiempo j , perteneciente al periodo por reconstruir, en la serie de referencia o largo plazo (ref)

1. Calculo coeficiente de correlación de Pearson (r)

$$x_i = GHI_{obj_i}$$
$$y_i = GHI_{ref_i}$$
$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^N y_i^2 - (\sum_{i=1}^N y_i)^2}}$$

- **Función lógica** $f(x, y)$, acepta (1) o rechaza (0) la serie de referencia según el valor r calculado

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & r_{xy} \geq 0,9 \\ 0 & d.l.c \end{cases}$$

2. Ajustar modelo

- N es igual a la cantidad de datos existentes en el periodo de entrenamiento del modelo, es decir, año común de datos para la serie de ref y obj

```
if  $f(x, y) = 1$  then
  for  $i=1:N$  do
     $\overline{GHI}_{obj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GHI_{obj_i}$ 
     $\overline{GHI}_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GHI_{ref_i}$ 
     $\sigma_{obj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (GHI_{obj_i} - \overline{GHI}_{obj})^2}{N - 1}}$ 
     $\sigma_{ref} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (GHI_{ref_i} - \overline{GHI}_{ref})^2}{N - 1}}$ 
  end
```

end

- **Forma general del modelo**

$$y = mx + b \text{ (Modelo lineal)}$$

Donde:

$$y = GHI_{obj_j}, m = \frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}}, x = GHI_{ref}, b = [\overline{GHI}_{obj} - (\frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}})\overline{GHI}_{ref}]$$

Finalmente:

$$GHI_{obj_j} = (\frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}})GHI_{ref} + [\overline{GHI}_{obj} - (\frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}})\overline{GHI}_{ref}]$$

3. Reconstrucción serie histórica

- P es igual a la cantidad de datos existentes en el periodo por reconstruir, es decir, años no disponibles en la serie de 10 años requerida para el punto obj
- GHI_{obj_j} es un vector $1 \times P$

```
for  $j$  in  $1:P$  do
  - Calcula la serie historica en el punto  $obj$  a partir la serie  $ref$ 
  if  $GHI_{ref_j} > 0$  then
     $GHI_{obj_j} = [\overline{GHI}_{obj} - (\frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}})\overline{GHI}_{ref}] + (\frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{ref}})GHI_{ref_j}$ 
  else
     $GHI_{obj_j} = 0$ 
  end
end
```

end

Figura 40. Metodología para verificación y reconstrucción de series históricas.

5. Referencias

- [1 R. Perez, C. Hoyer-Klick y D. Renné, «Development of a Benchmarking Tool for Solar Energy Resource Datasets. A Guide for Non-Expert Users to Determine the most Appropriate Use of Solar Energy,» 2011. [En línea]. Available: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:128302/datastreams/file_13cb546f-1617-45de-8546-20e270728df6/content.
- [2 IRENA, S. Ross, I. Moya, J. Badger, F. Bingol, D. Renne, C. Hoyer-Klick y G. Lizcano, «Data quality for the Global Renewable Energy Atlas – Solar and Wind Concept paper,» IRENA, http://globalatlas.irena.org/UserFiles/Publication/GA_Solar&Wind_Web.pdf, 2013.
- [3 J. Ruiz-Arias, S. Quesada-Ruiz, E. Fernández y C. Gueymard, «Optimal combination of gridded and ground-observed solar radiation data for regional solar resource assessment,» *Solar Energy*, pp. 411-424, 2015.
- [4 A. McMahan, C. Grover y F. Vignola, «Evaluation of Resource Risk in Solar-Project Financing in Solar-Project Financing,» de *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Oxford, , Academic Press is an imprint of Elsevier, 2013, pp. 82-95.
- [5 NREL, «Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications,» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63112.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [6 MESOR, «Management and exploitation of solar resource knowledge,» 2010. [En línea]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00468639/document>. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [7 H. G. Beyer, J. Polo Martinez, M. Suri, J. L. Torres, E. Lorenz, S. C. Müller, C. Hoyer-Klick y P. Ineichen, «D 1.1.3. Report on Benchmarking of Radiation Products,» 2009.
- [8 CREG, «Resolución 201 de 2017,» Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá, 2017.
- [9 WMO, «Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation,» World Meteorological Organization, Switzerland, 2014.
- [1 IEA SHC, «Task 46: Best Practices for Solar Irradiance Measurements with Rotating Shadowband 0 Irradiometers,» *IEA SHC Solar Update Newsletter*, vol. 62, pp. 15-68, 2015.
- [1 American Solar Energy Society, «ISO-9060 Standar & Pyranometer Measurement Accuracy,» 2012. [En línea]. Available: https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf.
- [1 «Hukseflux,» 2017. [En línea]. Available: https://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SR20_manual_v1713.pdf.
- [1 E. Riley, «Sandia,» 2013. [En línea]. Available: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/50-3 Riley-Standards-for-Acceptance-Testing-and-Model-Validation_ERiley.pdf0Xq.pdf.
- [1 EPLAB, «ISO 9060 Pyranometer Classification,» [En línea]. Available: http://www.eppleylab.com/wp-content/uploads/2016/09/pyranometer_specifications.pdf.
- [1 NREL, «Monitoring System Performance,» Febrero 2011. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50643.pdf>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [1 F. Vignola y G. C. McMahan A, «Bankable Solar-Radiation Datasets,» de *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, San Diego, Academic Press, 2013, pp. 97-131.
- [1 K. & Zonen, «Kipp & Zonen,» 2017. [En línea]. Available: https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwje_Jv8gr7WAhXB31QKHZdrDisQFgg7MAE&url=http%3A%2F%2Fwww.kippzonen.com%2FDownload%2F72%2FManual-Pyranometers-CMP-series-English&usg=AFQjCNHmnyGes9MgdMTA34NopkHRPS08OQ.

- [1 J. Paredes y J. Ramírez, «Energías renovables y su contribución a la seguridad energética: complementariedad en Colombia,» BID, <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8146/Energias-renovables-variables-y-su-contribucion-a-la-seguridad-energetica-Complementariedad-en-Colombia.PDF?sequence=5>, 2017.
- [1 C. Gueymard y S. Wilcox, «Spatial and temporal variability in the solar resource: Assessing the value of short-term measurements at potential solar power plant sites,» de *ASES National Solar Conference*, Buffalo, NY, 2009.
- [2 C. Thuman, M. Schnitzer y P. Johnson, «QUANTIFYING THE ACCURACY OF THE USE OF MEASURE-0] CORRELATE-PREDICT METHODOLOGY FOR LONG-TERM SOLAR RESOURCE ESTIMATES,» 2012.
- [2 R. Meyer, J. Torres, G. Marquardt, M. Schwandt, N. Geuder, C. Hoyer-Klick, E. Lorenz, A. Hammer y H. Beyer, 1] «Combining solar irradiance measurements and various satellite-derived products to a site-specific best estimate,» de *SolarPACES Symposium*, Las Vegas, 2008.
- [2 D. Myers, «Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model 2] quality,» *Energy*, vol. 30, pp. 1517-1531, 2005.
- [2 M. Suri y T. Cebecauer, «Requirements and Standards for Bankable Dni Data Products in Csp Projects,» de 3] *Proceedings of the SolarPACES Conference*, Granada, 2011.
- [2 T. Mieslinger, F. Ament, K. Chhatbar y R. Meyer, «A new method for fusion of measured and model-derived 4] solar radiation time-series,» de *SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, Freiburg, 2014.
- [2 G. Bender y C. Gueymard, «THE ROAD TO BANKABILITY: IMPROVING ASSESSMENTS FOR MORE ACCURATE 5] FINANCIAL PLANNING,» de *Solar 2011 Conf*, Raleigh, 2011.
- [2 C. Gueymard, W. Gustafson, G. Bender y A. S. P. Etringer, «Evaluation of procedures to improve solar 6] resource assessments: optimum use of short-term data from a local weather station to correct bias in long-term satellite derived solar radiation time series,» de *World Renewable Energy Forum*, Denver, 2012.
- [2 A. Rogers, J. Rogers y J. Manwell, «Comparison of the performance of four measure-correlate-predict 7] algorithms,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, nº 3, pp. 243-264, 2005.
- [2 J. Carta, S. Velázquez y P. Cabrera, «A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate 8] long-term wind characteristics at a target site,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 362-400, 2013.
- [2 Y. Rochtus, «Filling gaps in time series in urban hydrology,» pp. 1-11, 2014. 9]
- [3 N. V. D.Papale, «Filling the gaps in meteorological continuous data measured at FLUXNET sites with ERA-0] Interim reanalysis,» pp. 157-171, 2015.
- [3 F. A. P. & M. S.Kandasamy, «A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote 1] sensing observations- applications to MODIS LAI products,» pp. 4055-4071, 2013.
- [3 A. Derrick, «Development of the measure correlate predict strategy for site assessment,» de *BWEA*, UK, 2] 1992.
- [3 «Manual of the Global Observing System,» de *Manual of the Global Observing System*, Suiza, 2003, pp. III-3] 18.
- [3 hukseflux, «USER MANUAL SR20, Secondary standard pyranometer,» 2017. [En línea]. Available: 4] https://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SR20_manual_v1713.pdf. [Último acceso: Agosto 2017].
- [3 NOAA, «Climate.gov,» National Oceanic and Atmospheric Administration , 30 Agosto 2009. [En línea]. 5] Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>. [Último acceso: 4 Septiembre 2017].

- [3 NOAA, «National Weather Service - Climate Prediction Center,» National Oceanic and Atmospheric Administration, 4 Noviembre 2014. [En línea]. Available: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. [Último acceso: 5 Septiembre 2017].
- [3 Fonroche Renewable Energies, S.L.U., «Consultoría para establecer una metodología para el cálculo de 7] energía firme de una planta solar,» 2016.
- [3 A. Rogers, J. Rogers y J. Manwell, «Comparison of the performance of four measure–correlate–predict 8] algorithms,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, pp. 243-264, 2005.

