
Bogotá D. C., 26 de octubre de 2017

Doctor
German Castro Ferreira
Director Ejecutivo
Comisión de Regulación de Energía y Gas
Ciudad

Asunto: Adopción del Protocolo de revisión y análisis de series históricas para cálculo de ENFICC en plantas solares fotovoltaicas.

Respetado Doctor Castro:

En cumplimiento del mandato de la Resolución CREG 243 de 2016, adjuntamos a la presente el "Protocolo de revisión y análisis de series históricas para cálculo de ENFICC en plantas solares fotovoltaicas" elaborado por la Universidad de los Andes, en el marco del convenio de cooperación académica celebrado con la universidad por el CNO.

El protocolo fue socializado con la Comisión Temporal de Trabajo de Plantas Solares del CNO, agentes del SIN y dictaminadores y se recibieron comentarios de un dictaminador, de EMGESA y ENEL GREEN POWER.

Para gestionar la expedición del acuerdo por parte del Consejo desde el punto procedimental, quedamos a la espera de la expedición de la resolución definitiva sobre el tema.

Atentamente,


ALBERTO OLARTE AGUIRRE
Secretario Técnico

Adjunto lo anunciado

Protocolo: revisión y análisis de series históricas para cálculo de ENFICC en plantas solares fotovoltaicas

Octubre de 2017

Contenido

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABLAS.....	5
1. OBJETO.....	6
2. REVISIÓN ESTÁNDARES INTERNACIONALES.....	7
3. MEDICIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL Y TEMPERATURA AMBIENTE	9
3.1. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS	9
Irradiancia Global Horizontal (GHI).....	10
Temperatura Ambiente (TA).....	11
3.2. SELECCIÓN ZONA DE INSTALACIÓN	12
3.3. INSTALACIÓN	12
3.4. CALIBRACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN	13
Irradiancia Global Horizontal (GHI).....	13
Temperatura Ambiente (TA).....	13
3.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	14
4. METODOLOGÍA DE AJUSTE Y CORRECCIÓN PARA ESTIMACIÓN DE SERIES DE LARGO PLAZO	15
4.1. Metodología Medición-Correlación-Predicción (MCP).....	16
4.1.1. VALORACION INFORMACIÓN DISPONIBLE	17
4.1.2. MÉTODO DE LLENADO DE SERIES DE TIEMPO	18
4.1.3. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE (LR)	23
4.1.4. PROPORCIÓN DE VARIANZAS (VR)	25
4.2. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN	27
4.2.1. Las Flores – Barranquilla.....	27
4.2.2. Univalle - Cali.....	30
4.2.3. Carmen de Bolívar.....	31
4.2.4. MetroMedellin – Medellín.....	32
4.2.5. UTM – Santa Marta.....	34
4.5.6. San Marcos – Sucre.....	35
4.5.7. Uribia – La Guajira.....	36
4.5.8. Fedearroz – Valledupar.....	37
5. PROTOCOLO.....	39
5.1. Requisitos mínimos para la medición de irradiancia solar y temperatura ambiente.....	39
5.2. Metodología para la verificación y ajuste de series de tiempo	42
6. REFERENCIAS	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESO DE MEDICIÓN DE VARIABLES, FIGURA ELABORADA POR UNIANDES A PARTIR DE [9] Y [10]	9
FIGURA 2. COMPARACIÓN HISTÓRICA PARA FUENTES DISPONIBLES	20
FIGURA 3. COMPARACIÓN IDEAM VS. ONI	21
FIGURA 4. COMPARACIÓN NREL VS. ONI	21
FIGURA 5. COMPARACIÓN SOLARGIS VS. ONI	21
FIGURA 6. COMPARACIÓN HISTÓRICA PARA FUENTES DISPONIBLES VS ONI, PROMEDIOS TRIMESTRALES	22
FIGURA 7. COMPARACIÓN IDEAM VS NREL, TIEMPO COMÚN 2013	22
FIGURA 8. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R^2 , TIEMPO COMÚN 2013	23
FIGURA 9. REGRESIÓN LINEAL AJUSTADA PARA EL TIEMPO COMÚN, 2013	24
FIGURA 10. RECONSTRUCCIÓN SERIE HISTÓRICA 10 AÑOS LR. AJUSTE CON 12 MESES	24
FIGURA 11. RECONSTRUCCIÓN SERIE HISTÓRICA 10 AÑOS PARA VR. AJUSTE CON 12 MESES	26
FIGURA 12. 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	28
FIGURA 13. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE BARRANQUILLA.	29
FIGURA 14. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	29
FIGURA 15. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	29
FIGURA 16. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE CALI	30
FIGURA 17. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	30
FIGURA 18. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	31
FIGURA 19. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE CARMEN DE BOLÍVAR.	31
FIGURA 20. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	32
FIGURA 21. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS.	32
FIGURA 22. RMSE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	33
FIGURA 23. MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	33
FIGURA 24. KSI (%) VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	33
FIGURA 25. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE SANTA MARTA	34
FIGURA 26. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE MESES MEDIDOS	34
FIGURA 27. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	34
FIGURA 28. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE SUCRE	35
FIGURA 29. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	35
FIGURA 30. KSI(%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	35
FIGURA 31. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE LA GUAJIRA	36
FIGURA 32. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	36
FIGURA 33. KSI(%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS.	37
FIGURA 34. RESULTADO DE LA RECONSTRUCCIÓN PARA LA ESTACIÓN DE VALLEDUPAR.	37
FIGURA 35. RMSE Y MBE VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDO	38
FIGURA 36. KSI (%) VS CANTIDAD DE DATOS MEDIDOS	38

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. APARTE ANEXO 1. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN PARA CATEGORÍA BUSINESS (POLICY AND BUSINESS) [2]	8
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PIRANÓMETROS RECOMENDADOS SEGÚN LA NORMA ISO 9060:1990	11
TABLA 3. INTERVALOS DE CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN. OBTENIDO DE: [9]	11
TABLA 4. TERMÓMETROS RECOMENDADOS POR TIPO	12
TABLA 5. NORMATIVIDAD DISPONIBLE PARA TERMÓMETROS POR TIPO	14
TABLA 6. RESUMEN DATOS DE LAS ESTACIONES DE MEDICIÓN	17
TABLA 7. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. LR NREL	25
TABLA 8. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. LR SOLARGIS	25
TABLA 9. PARÁMETROS VR, CASO APLICADO	26
TABLA 10. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. VR NREL	26
TABLA 11. INDICADORES DE ERROR PARA RECONSTRUCCIÓN. VR SOLARGIS	27
TABLA 12. PARÁMETROS VR PARA LAS FLORES, SENSIBILIDAD DE 4 NIVELES	28

1. OBJETO

La resolución CREG 243 de 2016 estableció la metodología de cálculo de la Energía en Firme para el Cargo por Confiabilidad-ENFICC para plantas de generación solar fotovoltaica. En dicha Resolución, se requiere el suministro de series de tiempo de 10 años para la radiación global horizontal (GHI) y la temperatura ambiente (TA) en resolución horaria. Reconociendo la dificultad de contar con información de buena calidad para periodos de tiempo tan largos, la misma resolución acepta la construcción de las series a partir de bases de datos con información satelital y otras estaciones de medida.

El objetivo de este documento es presentar un protocolo para la medición, verificación y reconstrucción de series de tiempo históricas de irradiación horizontal global y temperatura ambiente. La propuesta se elabora a partir de una revisión detallada de la literatura, en particular las recomendaciones y buenas prácticas de la industria de la energía solar a nivel mundial.

2. REVISIÓN ESTÁNDARES INTERNACIONALES

Diferentes organizaciones y alianzas se han establecido alrededor del desarrollo de 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 la 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) ¹ [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 recurso², es posible combinar mediciones en sitio con *fuentes secundarias* de información³. Estas fuentes secundarias se refieren a bases de datos construidas a partir de modelos basados en información satelital o modelos NWP (Numerical Weather Prediction⁴), al igual que otras estaciones de medición cercanas climatológicamente hablando. Existen gran variedad de bases de datos, 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 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 (Solar and Wind Resource Assessment, SWERA) es crucial en las primeras etapas de pre-factibilidad, 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.

¹ 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.

² 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 año. 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].

³ En este documento también se hace referencia a las fuentes secundarias de información como bases de datos satelitales o información satelital.

Tabla 1. Aparte Anexo 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 independientes fuentes de información ⁴	Medidas en sitio ⁴	Información disponible cerca al punto de interés
Decisión de inversión							
Pequeños proyectos PV	10	Horaria	5	Sí	Sí	Sí	Sí/No
Medianos proyectos PV	10	Horaria	10	Sí	Sí	Sí	Sí
Grandes desarrollos PV	10	Horaria	10	Sí	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 Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) publicó el Manual de Buenas Prácticas para la Recolección y Uso de Datos del 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 para este documento.

En el Capítulo 3 de este informe se establecen los estándares y recomendaciones mínimas para la medición de irradiancia 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 4 se presenta la Metodología para la Validación y Ajuste de series de tiempo de fuentes secundarias y su eficacia en términos de reducción del error de sesgo. Al respecto, se validó para diferentes puntos a lo largo del territorio nacional. Finalmente, con base en el estudio realizado, en el Capítulo 5 se presenta el protocolo con las condiciones mínimas para realizar una campaña de medición de la irradiancia 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].

3. MEDICIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL Y TEMPERATURA AMBIENTE

La medición precisa y exacta de la Irradiancia Global Horizontal (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 pueden estar acompañadas de otras variables como precipitación y velocidad de viento, dependiendo del interés y la aplicación de la información. En la resolución CREG 243 de 2016, que establece la metodología para el cálculo de la energía en firme para plantas solares fotovoltaicas, se hace referencia al requerimiento de información de largo plazo 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 indicado por el fabricante. Luego es necesario realizar pruebas de calibración iniciales respecto a un estándar aceptado, ello con la intención de verificar el correcto funcionamiento de los equipos. El proceso de calibración varía de dispositivo a dispositivo y se espera que este sea certificado por una entidad competente. 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]

3.1. 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.

Irradiancia Global Horizontal (GHI)

La medición exacta 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 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 detectores termoelectricos o fotoelectricos con un campo de visión semiesférico de 360 grados. 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 o un difusor, ambos diseños protegen el detector del ambiente y proveen 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 irradiancia solar [11] [9] [12] [13]. La clasificación se basa en la incertidumbre esperada para cada tipo de instrumento. Por el lado de la WMO, los piranómetros se pueden clasificar como de Alta Calidad (High Quality), Buena Calidad (Good Quality) y 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 Irradiación Global Horizontal 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 satisfacer las normas mencionadas anteriormente. Se recomienda remitirse a las referencias [9] [11] [14]. Adicionalmente, estas mismas especificaciones se encuentran en el documento de buenas prácticas publicado por NREL y otros institutos a nivel mundial [5] [10] [15] [9]. Para que la información obtenida de una medición sea útil, 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	Estándar secundario	Primera clase
Respuesta en el tiempo	< 15 sec	< 30 sec
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 direccional	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²
Respuesta por la temperatura: Debido a cambios en la temperatura ambiente en un intervalo de 50K.	2%	4%
Respuesta por inclinación: Desviación en la respuesta con cambios en la inclinación para una irradiancia de 1000 W/m ²	± 0.5%	± 2 %

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. Se debe asegurar y reportar que el proceso de instalación y calibración de los equipos se lleve a cabo siguiendo las indicaciones del fabricante.

Temperatura Ambiente (TA)

Con el fin de medir los datos de temperatura ambiente es recomendable utilizar un termómetro eléctrico o un termómetro de estación (cápsula de vidrio con mercurio). Los termómetros eléctricos pueden ser de resistencias eléctricas, termistores o termopares. Las mediciones se deben realizar entre 1.25 y 2 metros de altura. 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 K
Máxima diferencia, entre las correcciones máximas y mínimas dentro del rango	0.2 K
máxima variación de corrección en un intervalo de 10° C.	0.1 K

A continuación, se presentan las características que un buen termómetro debe tener con el fin de medir correctamente:

- Las propiedades físicas y químicas permanecen constantes para todo el rango de medición.
- Las características no cambian por al menos durante dos años.
- Deben tener una constante de tiempo pequeña con el fin de poder registrar valores de temperatura cada uno o dos segundos.

- Para los termómetros eléctricos la capacidad térmica debe ser elevada, ya que pueden presentar problemas de auto calentamiento.
- Para los termómetros de resistencia eléctrica:
 - La resistencia deberá aumentar de manera uniforme a medida que se incremente la temperatura.
 - La resistencia y coeficiente térmico deben ser lo suficientemente elevados para ser utilizados en un circuito de medición.

Dependiendo de la clasificación de instrumento seleccionado, la Tabla 4 presenta el tipo de termómetro recomendado de acuerdo con [9].

Tabla 4. Termómetros recomendados por tipo

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

3.2. SELECCIÓN ZONA DE INSTALACIÓN

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

- Los instrumentos no deben ser instalados cerca de paredes claras u otros objetos, que puedan reflejar energía solar 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.
- La distancia entre los sensores y el obstáculo más cercano debe ser al menos 10 veces la diferencia en altura entre el sensor y el punto máximo del obstáculo.
- 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.

3.3. INSTALACIÓN

La instalación de cualquier instrumento de medición *deberá realizarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante*. Otros aspectos como: i) disposiciones de seguridad de los equipos, ii) interacción entre distintos sensores, iii) que la radiación reflejada desde el suelo o la base no afecten la medición y iv) 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 la medición de GHI.

Como los piranómetros son sensibles a la temperatura, se recomienda no ubicarlos en contacto directo con la placa horizontal que los sostiene, para esto se recomienda utilizar una conexión con tornillos desde la placa hasta la parte inferior del instrumento. Finalmente se debe verificar que la placa este ubicada totalmente horizontal.

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

- El bulbo del mismo debe estar en la parte inferior y totalmente vertical.
- Instalar los dispositivos entre 1.25 y 2 m ⁷.
- Proteger el bulbo de la radiación solar, para esto la WMO recomienda instalar el termómetro con una garita.

3.4. CALIBRACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN

Irradiancia Global Horizontal (GHI)

Para la calibración de este instrumento se debe tener en cuenta los siguientes aspectos, siguiendo la norma ISO 9847:

- La resolución del instrumento (Cantidad más pequeña que puede ser detectado por este)
- Desvíos de la sensibilidad en el tiempo (La razón entre la señal eléctrica de salida y la irradiancia)
- Cambios en la sensibilidad del instrumento a partir de cambios ambientales como temperatura, humedad, presión o viento
- Cambios en la sensibilidad producidos por variaciones en la irradiancia
- Constante de tiempo del instrumento
- Incertidumbres producidas por el uso de equipos auxiliares

Por otra parte, algunos factores que pueden marcar diferencias en la calibración de los instrumentos son⁸:

- Métodos de calibración
 - Comparación con un pirheliómetro estándar para medir la irradiación normal directa y un piranómetro calibrado para medir la irradiación difusa
 - Comparación con un pirheliómetro estándar y un disco removible para el piranómetro
 - Comparación con un pirheliómetro estándar y dos piranómetros calibrados para medir irradiancia global y difusa
 - Comparando con un piranómetro estándar bajo otra condición ambiental (ejemplo: nubosidad)
 - En un laboratorio con una fuente de luz artificial con una incidencia normal o un ángulo (azimut y elevación) determinado
 - En un laboratorio simulando irradiación difusa
- Respuesta direccional del instrumento, es decir, que su comportamiento sea constante en todas las direcciones de medición
- La inclinación del piranómetro
- Temperatura ambiente

La calibración de estos instrumentos esta estandarizada por la norma ISO 9847:1992. Es recomendable verificar la calibración del instrumento (por ejemplo, mediante la comparación con un patrón de mayor calidad) cada dos años.

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. Es importante que

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

⁸ Aunque estos son los factores más relevantes, no son los únicos a tener en cuenta, para más información remítase a Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos, WMO, 2014, Sección 7.3.1. La norma ISO que debe cumplir la calibración de estos equipos es la 9060:1990.

la calibración se realice con laboratorios certificados por la ONAC (Organismo Nacional de acreditación de Colombia) con la norma para laboratorios de calibración ISO/IEC 17025:2005.

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)

De acuerdo con [9], las principales fuentes de error asociadas a los termómetros por tipo son:

- Termómetro de resistencias eléctricas y termistores:
 - Auto calentamiento.
 - Cambios abruptos en las resistencias.
 - Mala compensación entre el instrumento procesador y el termómetro.
- Termopares:
 - Cambios en las resistencias producidos por la temperatura.
 - Corrientes galvánicas producidas por el humedecimiento de los conductores o uniones.
- Termómetros de estación:
 - La principal fuente de error proviene de la radiación solar

3.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Las principales recomendaciones para el adecuado mantenimiento de los equipos de medición de GHI se encuentran en los manuales de uso realizados por los productores de piranómetros. 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 con el fin de eliminar la humedad en el instrumento. Por lo general cuando se requiere reemplazar esta parte, es porque ocurre un cambio de color en el gel de sílica. 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.

Los métodos que utiliza cada uno de los fabricantes se mencionan en sus respectivos manuales [18] [11]. 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. Cada instrumento debe tener su propio *datalogger* para evitar un punto de falla centralizado

que pueda causar pérdida de información. Además, la instrumentación redundante ayuda a minimizar la pérdida de datos causada por eventos fortuitos.

4. 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 la realización de mediciones de buena calidad, no existen muchos puntos con mediciones confiables y con información para largos periodos de tiempo, como los requerimientos para una correcta caracterización de la climatología de un lugar. Esto es especialmente cierto para Colombia. Las recomendaciones internacionales señalan un requisito mínimo de datos históricos de 10 años para poder capturar los ciclos climáticos de larga duración que pueden existir. Incluso hay fuentes que hacen referencia a la necesidad de datos por un periodo superior o igual a 30 e incluso 50 años, ello 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 243 de 2016 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 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 mismo, las variaciones que éste presenta a largo plazo e identificar posibles fenómenos que logren afectar su naturaleza. 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 de SWERA para 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, caso colombiano, los datos pueden contener fuertes sesgos positivos o negativos [19].

En algunos casos particulares, SolarGIS puede proporcionar valores del 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) 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 intentan disminuir la incertidumbre asociada a la 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 [20]. 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 [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27].

Por ejemplo, en [25] se desarrolla un modelo de ajuste polinómico de tercer grado para optimizar el estimador de error de sesgo entre los valores de 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 (KS1%). 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 [22], el autor propone combinar dos fuentes de información en un modelo, ello para reducir 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 se determinó como la inversa de la medida de su incertidumbre, esto respecto a los datos medidos en sitio. En cuanto a evaluadores de error se utilizaron sesgo medio (MB) y desviación cuadrática media (RMSD). De igual manera se hace referencia al uso de la prueba de Kolmogorov-Smirnov Integral (KSI) en la evaluación de series satelitales contra mediciones en sitio.

El siguiente estudio incluido en esta revisión fue desarrollado por 3TIER, empresa proveedora de bases de datos provenientes de análisis de imágenes satelitales [27]. 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 multilinear 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 de 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 irradiancia 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*). Dichos modelos actualmente son el estándar para la reconstrucción de series, obteniendo excelentes resultados, y se tienen reportes de su vigencia para la corrección y reconstrucción de datos solares [21]. Además, resalta la importancia de obtener series de tiempo adecuadas por un periodo igual o 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 [27], 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.

4.1. 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) a partir de 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. Este mismo principio se utiliza en los modelos MCP [16] [21], 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, convirtiéndose en el estándar aceptado para reconstrucción de series de largo plazo [28] y [29].

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

4.1.1. VALORACION INFORMACIÓN DISPONIBLE

El modelo se implementó y evaluó para 8 puntos con mediciones en sitio realizadas por el IDEAM, la Tabla 6 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.

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
Uribea 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	

Tabla 6. Resumen datos de las estaciones de medición

Cabe anotar 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 [30] [31] [32].

4.1.2. MÉTODO DE LLENADO DE SERIES DE TIEMPO

Para llenar vacíos que puedan existir en las mediciones en tierra, se utiliza la metodología planteada a lo largo de esta sección. Para que el procedimiento propuesto sea efectivo y no genere degradación de la información, **la serie de tiempo medida debe estar completa en por lo menos en un 95%**. Adicionalmente es **se establece el requerimiento de no tener huecos superiores a 2 semanas continuas**, ya que el método de llenado perdería precisión y se podrían incorporar sesgos adicionales. En el caso de tener más de un año de medición, es importante seguir cumpliendo el requisito de no tener vacíos por más de dos semanas continuas, y se debe cumplir igualmente el requisito de tener el 95% de la serie. Si existen huecos inferiores o iguales a dos semanas se puede remitir al literal e del método mencionado más adelante, con el fin de completar su serie.

A continuación, se lista el procedimiento para el llenado de los datos:

- Identificación de vacíos:
 1. Inicialmente se ordenan las series de acuerdo con el año y mes.
 2. Generar una lista de todas las horas que han pasado entre la primera y la última hora de cada serie.
 3. Se encuentra el promedio horario utilizando como parámetro la fecha (día/mes/año) y hora, por si existe más de un dato por hora, volver todo un registro horario.
 4. Se identifica con una marca distintiva las celdas vacías, que serán los huecos de la serie de tiempo en el periodo establecido.
- Llenado de vacíos series Radiación Global Horizontal (GHI):
 1. Partiendo de un análisis gráfico se debe establecer una tendencia estacional, horaria y mensual.
 2. Dado que se identificó que las series de radiación solar tomaban valores de cero (aproximadamente), ello entre las 18:30 y las 06:00, se supone que esto se debe a un error de sesgo en el aparato de medición.
 3. Los vacíos en el horario de 18:30 a 06:00 se toman como cero, esto por el supuesto anterior y por qué se sabe que en esta franja horaria no hay radiación solar.
 4. Para los demás horarios se aplica el siguiente algoritmo:
 - a. Identificar la media de cada grupo de datos. Como se nombró anteriormente, estos grupos son formados por los datos de cada hora (06:00- 18:30) de un mes en el mismo año. Ej: Un grupo de datos serán los datos de las 09:00 del mes de junio del 2010.
 - b. En estos mismos grupos de datos, se identifica la distribución que se maneja y con esto se calcula un factor de dispersión medio para el grupo.
 - c. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en alguna semana algún horario no tiene ni si quiera un dato.
 - d. En caso de que se presenta la situación nombrada en el literal c, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes de la semana anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos del 8 de junio del 2014 a las 10:00, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de las 10:00 de la mañana anterior y siguiente a esta fecha. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - e. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en algún mes algún horario no tiene ni si quiera un dato. Situación bastante frecuente en especial en las bases de datos con vacíos de más de 12 meses consecutivos.

- f. En caso de que se presenta la situación nombrada en el literal e, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes del año anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos a las 10:00 de junio del 2014, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de 10:00 de junio del 2013 y del 2015. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - g. Verificar que se cuenta con todas las medias y desviaciones para cubrir el intervalo de la serie.
 - h. Se genera un número para llenar los vacíos. Este se genera dentro de un intervalo de confianza que tiene como media, la media del grupo de ajuste de los datos cuyos extremos son la media \pm la desviación de este. Ej: Si se desea generar un dato de las 15:00 de Marzo de 2017, y tenemos que para ese grupo de ajuste la radiación es X y la desviación es Y , se genera un número aleatorio en el intervalo $[x-y; x+y]$.
5. Como prueba de funcionamiento del algoritmo, se almacenan los datos de media y desviaciones previas al llenado y se comparan con los datos "post-llenado", para ver que no haya variaciones significativas. En los casos donde el grupo de datos no está vacío por completo, se toma como representativo una variación del 10% en los indicadores. En los grupos totalmente vacíos no se puede definir un % de variación, ya que no hay dato real contra el cual compararlo.

- Llenado de vacíos series Temperatura Ambiente:

1. Partiendo de un análisis gráfico, establecer una tendencia estacional, horaria y mensual.
2. Para el llenado aplica el siguiente algoritmo:
 - a. Identificar la media de cada grupo de datos. Como se nombró anteriormente, estos grupos son formados por los datos de cada hora de un mes en el mismo año. Ej: Un grupo de datos serán los datos de las 09:00 del mes de junio del 2010.
 - b. En estos mismos grupos de datos, identificar la distribución que se maneja y con esto, establecer un factor de dispersión medio para el grupo.
 - c. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en alguna semana algún horario no tiene ni si quiera un dato.
 - d. En caso de que se presenta la situación nombrada en el literal c, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes de la semana anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos del 8 de junio del 2014 a las 10:00, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de 10:00 de la mañana anterior y siguiente a esta fecha. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - e. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en algún mes algún horario no tiene ni si quiera un dato. Situación bastante frecuente en especial en las bases de datos con vacíos de más de 12 meses consecutivos.
 - f. En caso de que se presenta la situación nombrada en el literal e, se procede a llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes del año anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos a las 10:00 de junio del 2014, aproximaremos usando un promedio de la media de los datos de 10:00 de junio del 2013 y del 2015. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - g. Verificar si se cuenta con todas las medias y desviaciones para cubrir el intervalo de la serie.
 - h. Se genera un número para llenar los vacíos. Este se genera dentro de un intervalo de confianza que tiene de media, la media de su grupo de datos cuyos extremos son la media \pm la desviación de este. Ej: Si se desea generar un dato de las 15:00 de marzo de 2017, y tenemos que para ese grupo de datos la radiación es X y la desviación es Y , se genera un numero aleatorio en el intervalo $[x-y; x+y]$.
3. Como prueba de funcionamiento del algoritmo, se almacenan los datos de media y desviaciones previas al llenado y se comparan con los datos "post-llenado" para ver que no haya variaciones significativas. En los casos donde el grupo de datos no está vacío por completo, se toma como representativo una variación del 10% en los indicadores. En los grupos totalmente vacíos no se puede definir un % de variación ya que no hay dato real contra el cual compararlo.

4.1.3. 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 2 compara la información disponible en dos fuentes de información secundaria, NREL y SolarGis, con mediciones en sitio en un punto geográfico particular suministrados por el IDEAM (los datos se presentan normalizados con respecto a la media). Para este caso, se puede observar que las fuentes secundarias sistemáticamente sobreestiman el recurso. Para el punto específico reportado en esta figura, para NREL el error de sesgo promedio es 20,2%, superior respecto a IDEAM. Por su parte SolarGis tiene un error de sesgo promedio de 24,6% con respecto a IDEAM.

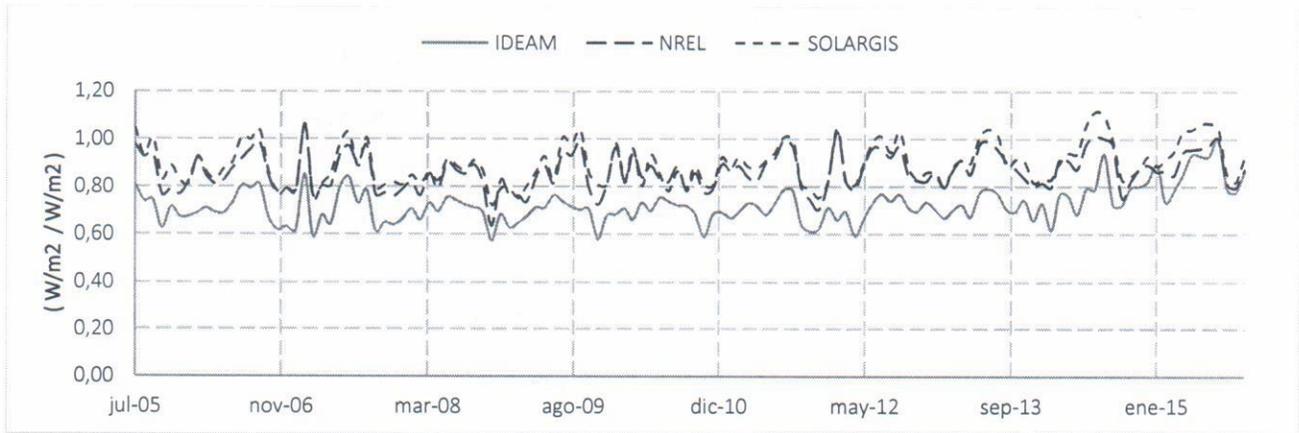


Figura 2. Comparación histórica para fuentes disponibles

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 (ONI⁹). Las comparaciones se presentan en las Figura 3, la Figura 4 y la Figura 5, 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.

⁹ Siguiendo la descripción del Servicio Meteorológico Nacional de los estados unidos (NWS), el Índice Oceánico del 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].

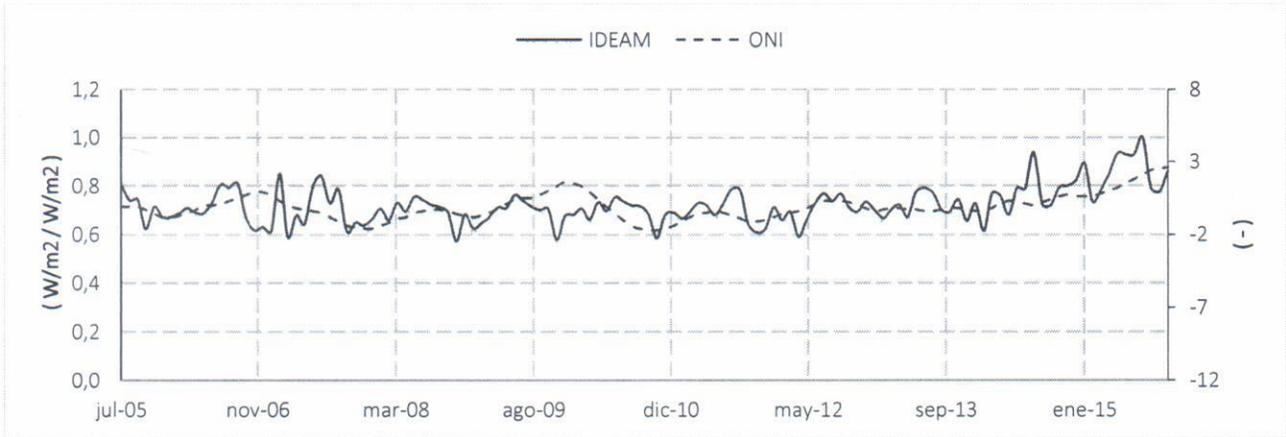


Figura 3. Comparación IDEAM vs. ONI

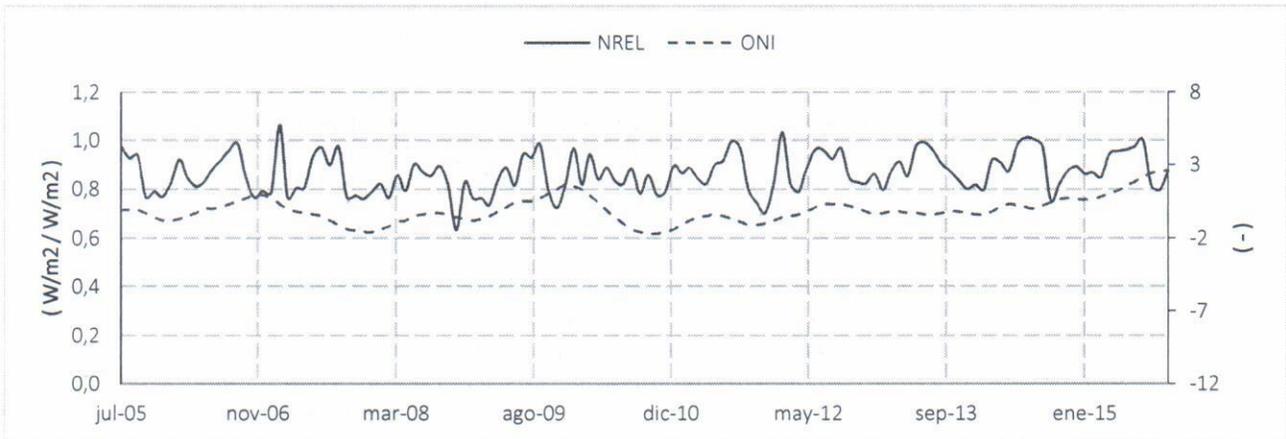


Figura 4. Comparación NREL vs. ONI

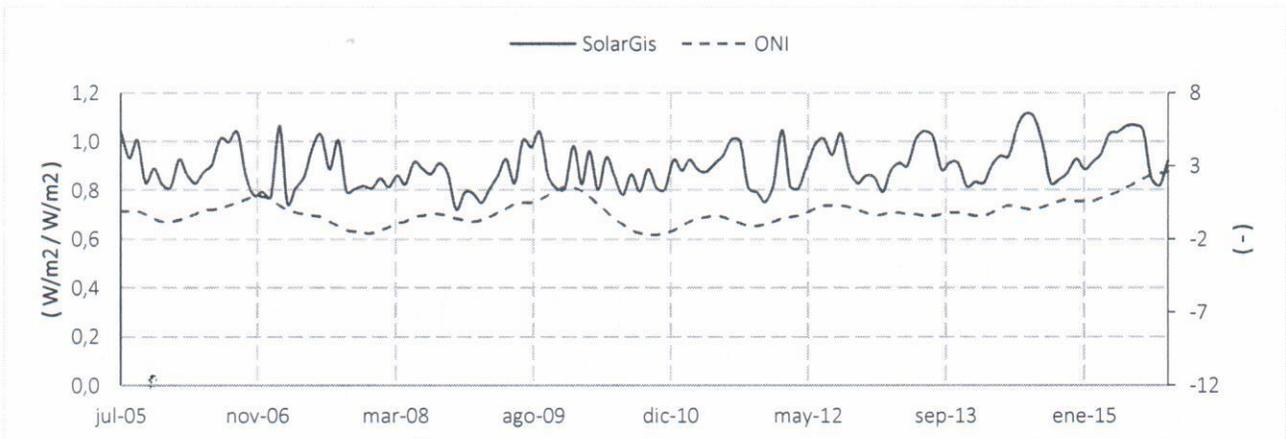


Figura 5. Comparación SolarGis vs. ONI

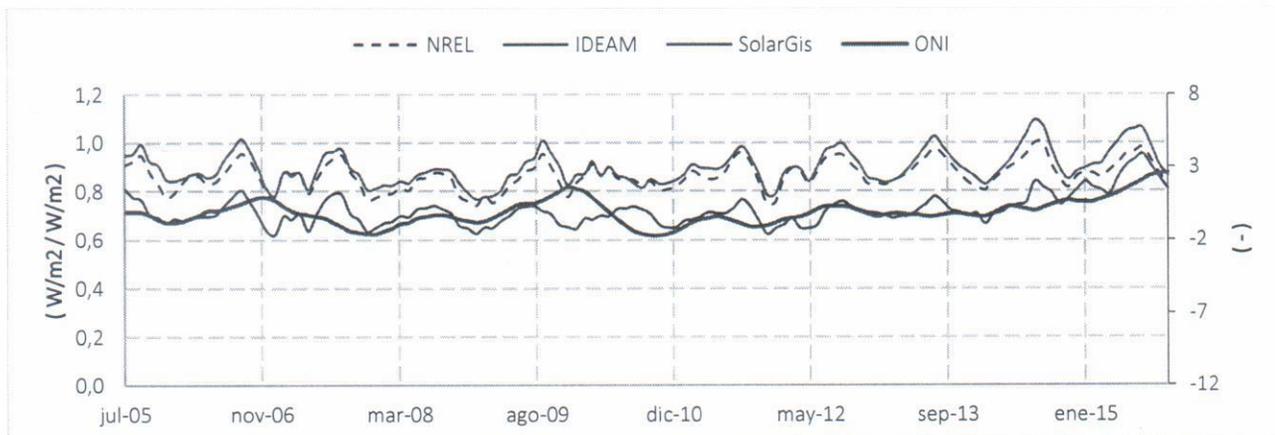


Figura 6. Comparación histórica para fuentes disponibles vs ONI, promedios trimestrales

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 7 compara el comportamiento de un año de datos para una de las estaciones de medición del 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 8 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 [31], 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.

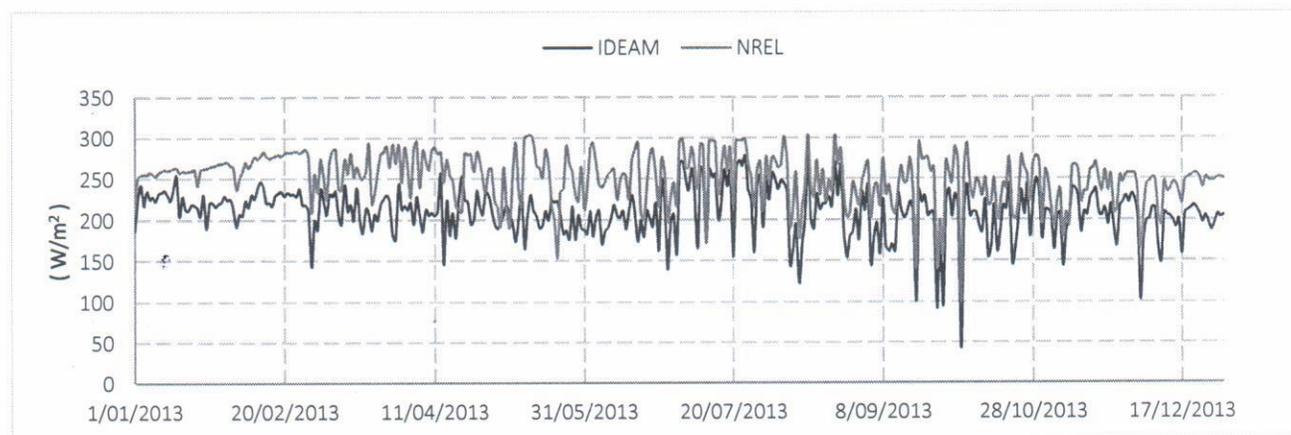


Figura 7. Comparación IDEAM vs NREL, tiempo común 2013

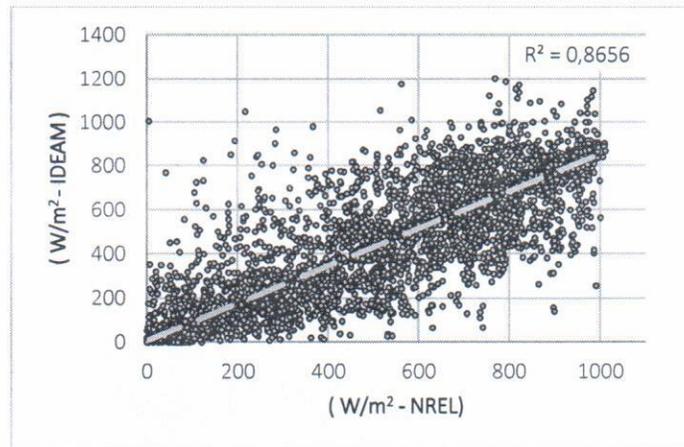


Figura 8. Coeficiente de determinación R^2 , tiempo común 2013

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.

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

4.1.4. 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 [33]. 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 [28]:

$$x = mx + b$$

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 9 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 la 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 Tabla 6. Los indicadores de error utilizados para evaluar el comportamiento del modelo se reportan en la Tabla 7 y la Tabla 8.

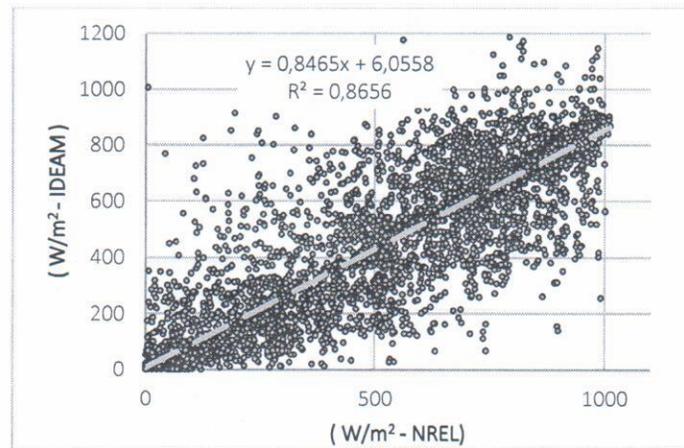


Figura 9. Regresión lineal ajustada para el tiempo común, 2013

A partir de la regresión lineal mostrada en la Figura 9 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 10, en la que adicionalmente se compara la serie RL-1 con la serie original del 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.

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

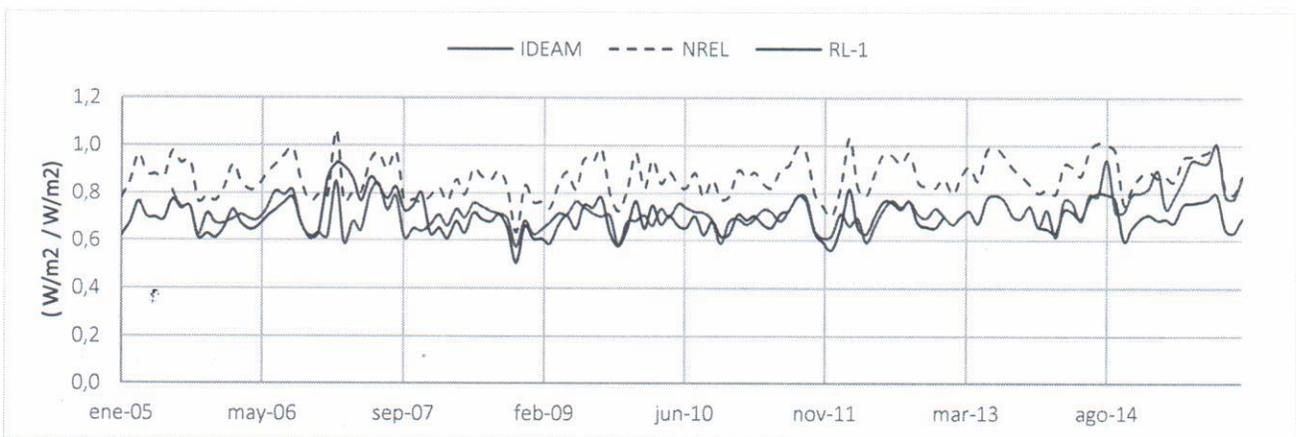


Figura 10. Reconstrucción serie histórica 10 años LR. Ajuste con 12 meses

En la Tabla 7 Tabla 6 se muestran los indicadores de error para la serie de NREL y para los ajustes 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%

4.1.5. 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, si se compara con la varianza de los valores observados o medidos en sitio, esto podría incluir un sesgo en el pronóstico realizado [28]. El siguiente modelo propuesto se denomina radio de varianzas y utiliza una relación entre la varianza de ambas series de datos, con la que es posible ajustar un modelo lineal de la siguiente forma:

$$\hat{y} = mx + b$$

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

$$m^2 = \frac{\sigma^2(\hat{y})}{\sigma^2(x)} \rightarrow \sigma^2(\hat{y}) = \sigma^2(y)$$

Finalmente se obtiene que,

$$\hat{y} = \left[\mu_y - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \mu_x \right] + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) x$$

$$GHI_{OBJ_i} = \left[\overline{GHI}_{OBJ} - \left(\frac{\sigma_{OBJ}}{\sigma_{REF}} \right) \overline{GHI}_{REF} \right] + \left(\frac{\sigma_{OBJ}}{\sigma_{REF}} \right) GHI_{REF_i}$$

Donde:

- 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 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} Irradiancia 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} Irradiancia 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 11 y en la Tabla 10. Por su parte la evaluación de la aplicación del modelo para la serie de datos SolarGis se reporta en la Tabla 11.

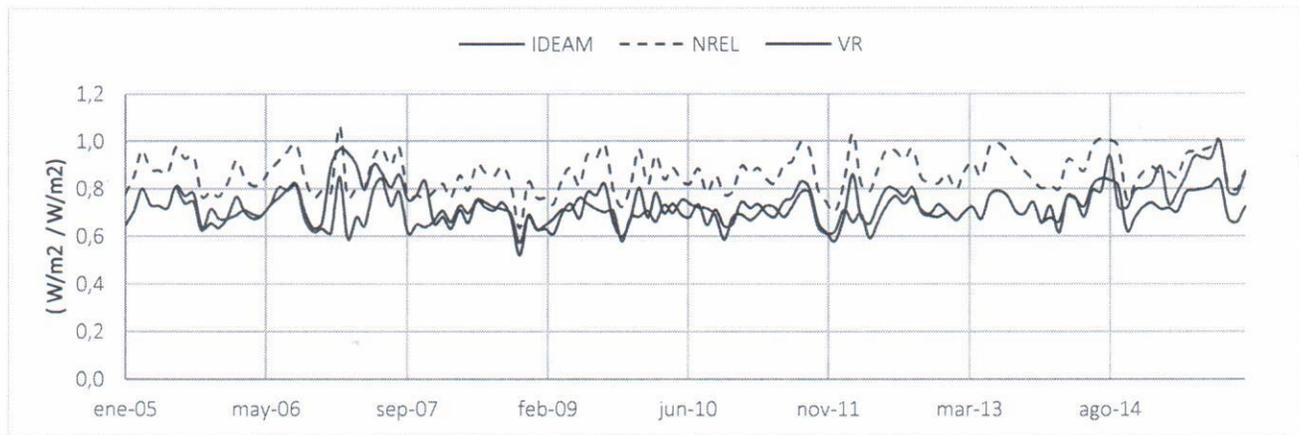


Figura 11. Reconstrucción serie histórica 10 años para VR. Ajuste con 12 meses

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%
KSí ^f	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 4.2.

Para temperatura no se muestra ningún ejercicio práctico debido a la calidad de los datos suministrados, sin embargo, esta metodología se ajusta también para las series de esta variable, la única diferencia notable con respecto a la radiación, es la no necesidad de ajustar la regresión lineal, ni el radio de varianzas a cero.

4.2. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

El procedimiento desarrollado en la sección anterior se replicó con la información proporcionada para las ubicaciones restantes reportadas en la Tabla 6, 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.

4.2.1. Las Flores – Barranquilla

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

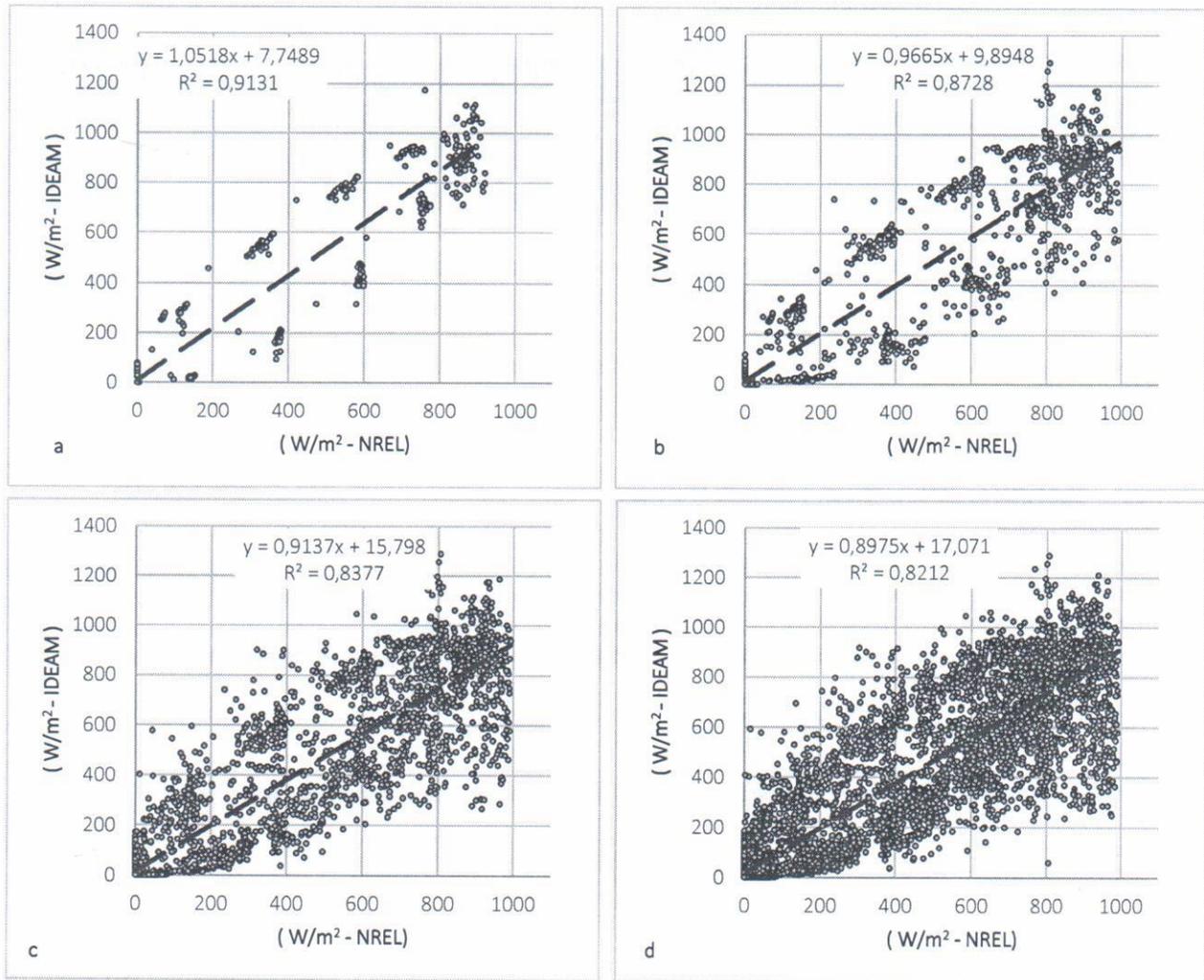


Figura 12. Ajuste lineal para Las Flores, a) ajuste con 3 meses de datos; b) ajuste con 6 meses de datos; c) ajuste con 9 meses de datos y d) ajuste con 12 meses de datos

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

Valor	1 mes		3 meses		6 meses		12 meses	
	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.

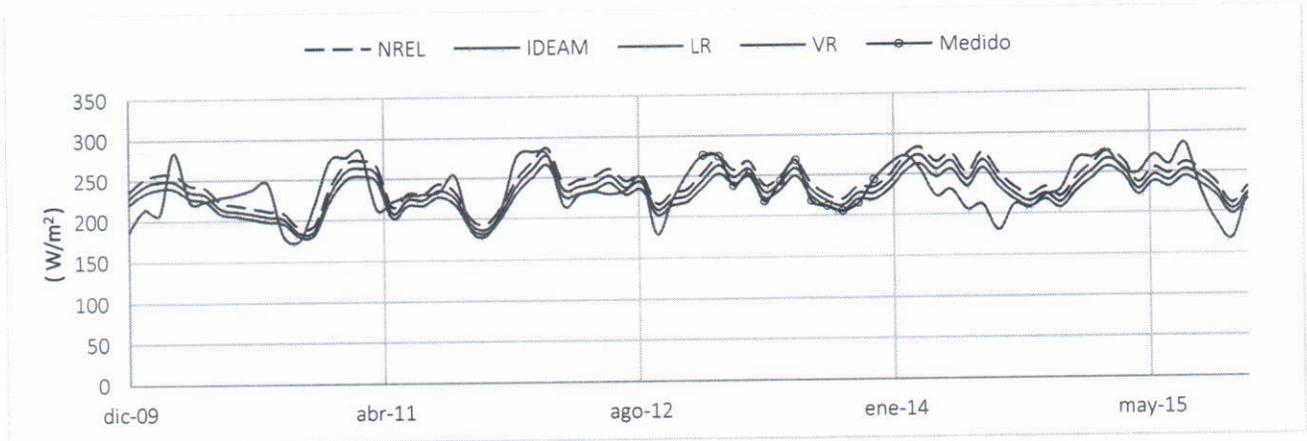


Figura 13. Resultado de la reconstrucción para la estación de Barranquilla.

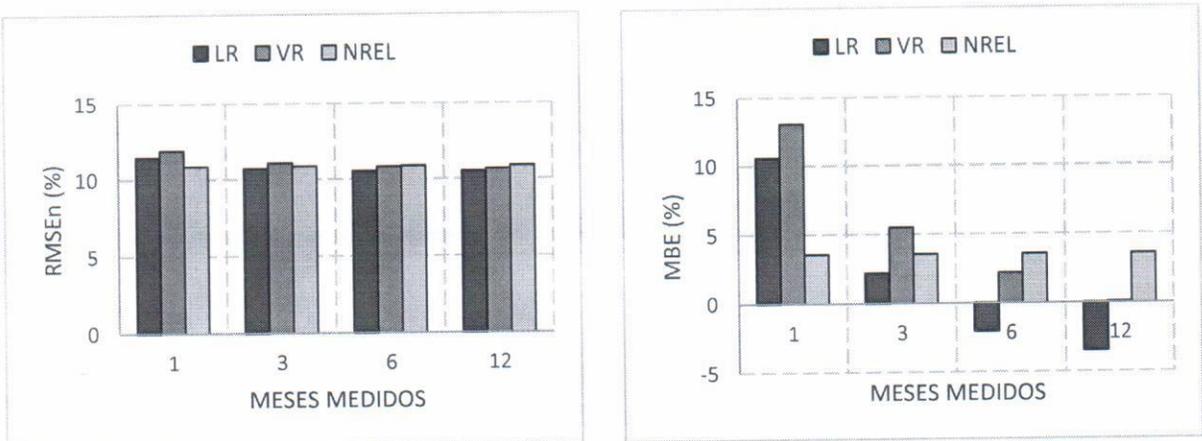


Figura 14. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

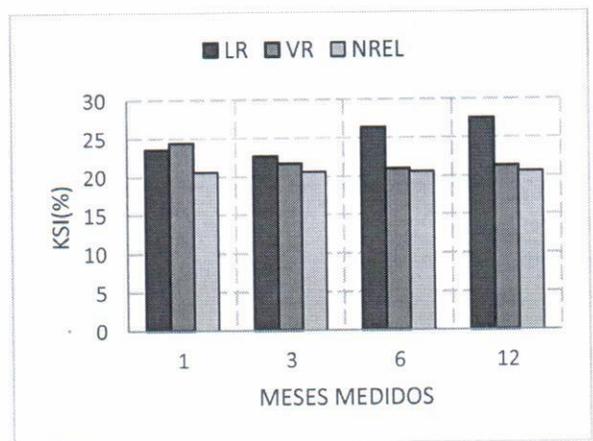


Figura 15. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

Como se puede observar a partir de las figuras, 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 indicador no se ve afectado de manera significativo. Es decir, las distribuciones de probabilidad de ocurrencia de los valores de radiación son similares.

4.2.2. Univalle - Cali

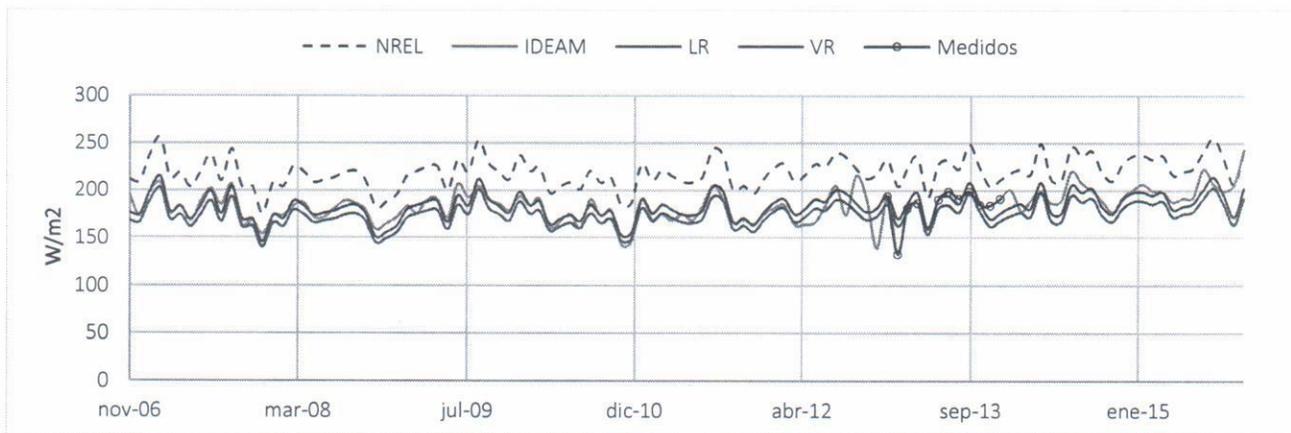


Figura 16. Resultado de la reconstrucción para la estación de Cali

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

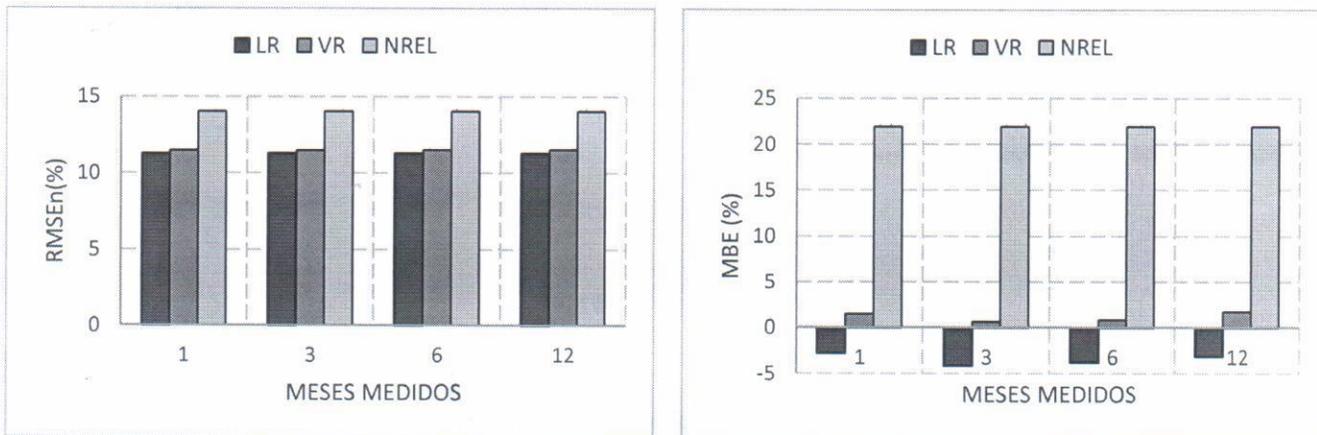


Figura 17. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

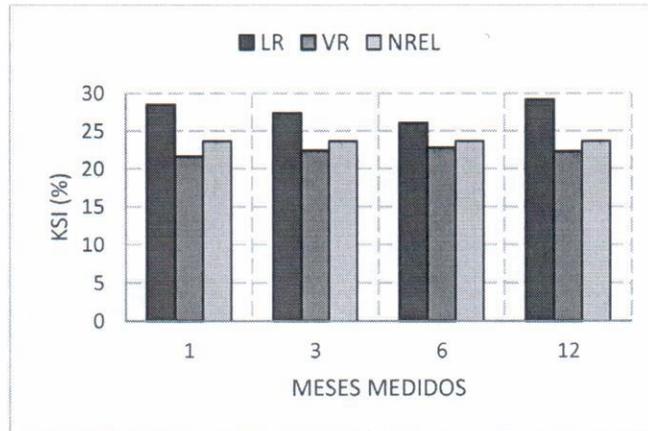


Figura 18. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

El comportamiento para esta ubicación demuestra correctamente el funcionamiento del método de VR, ya que 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.

4.2.3. Carmen de Bolívar

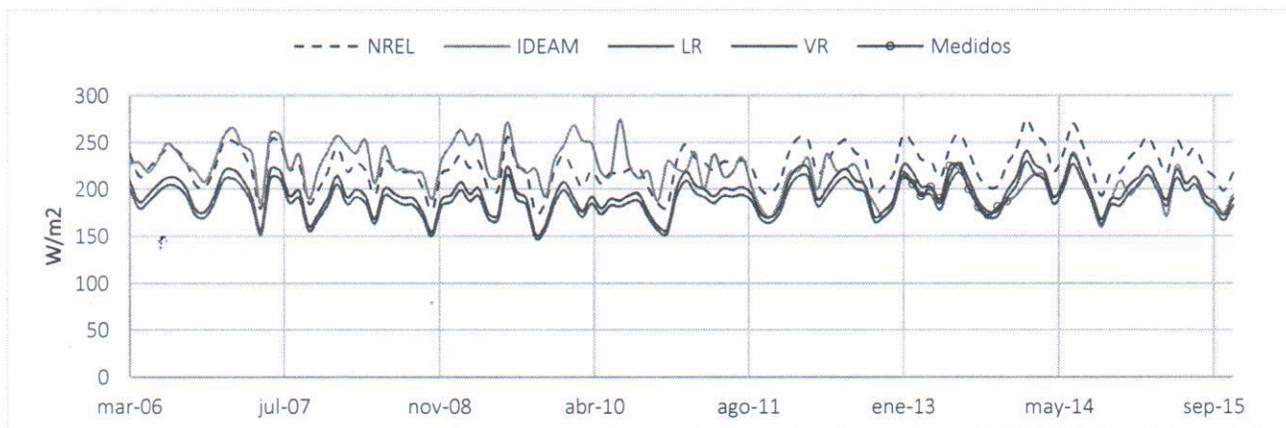


Figura 19. Resultado de la reconstrucción para la estación de Carmen de Bolívar.

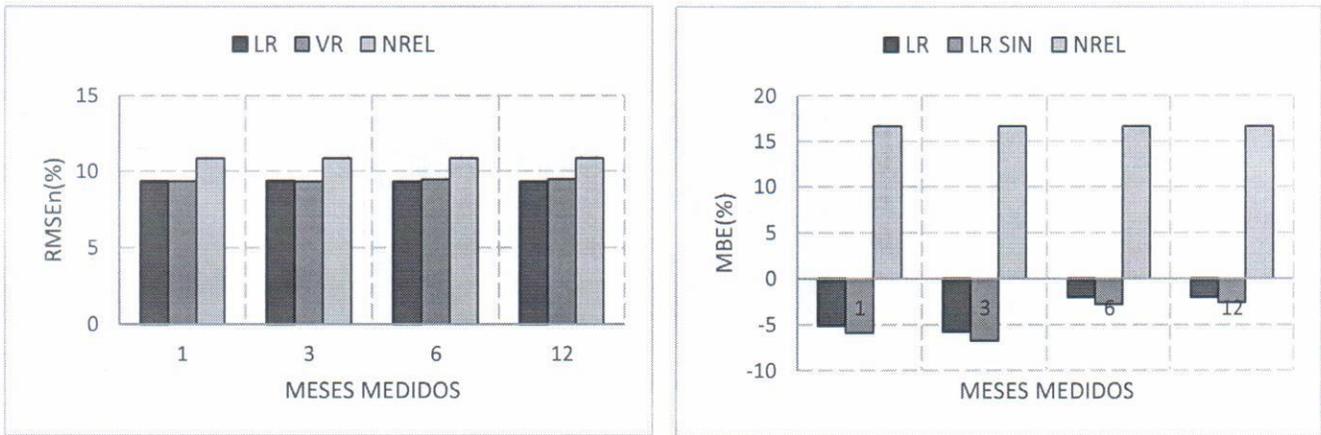


Figura 20. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

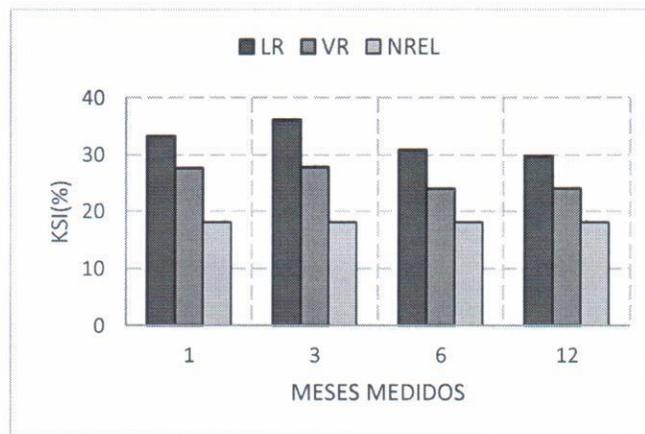


Figura 21. KSI (%) vs Cantidad de Meses medidos.

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 en 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.

4.2.4. MetroMedellin – Medellín

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

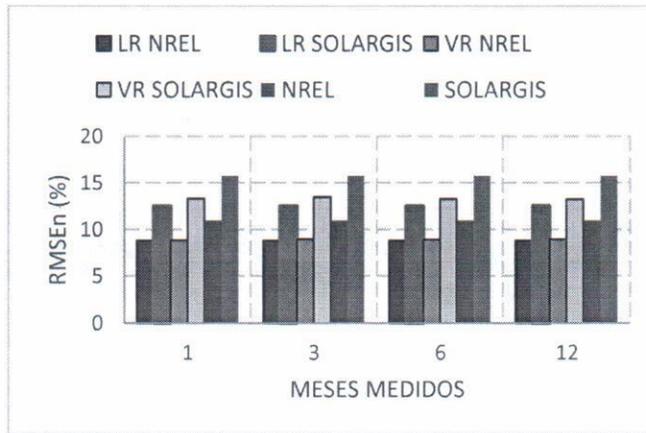


Figura 22. RMSE vs Cantidad de Meses Medidos

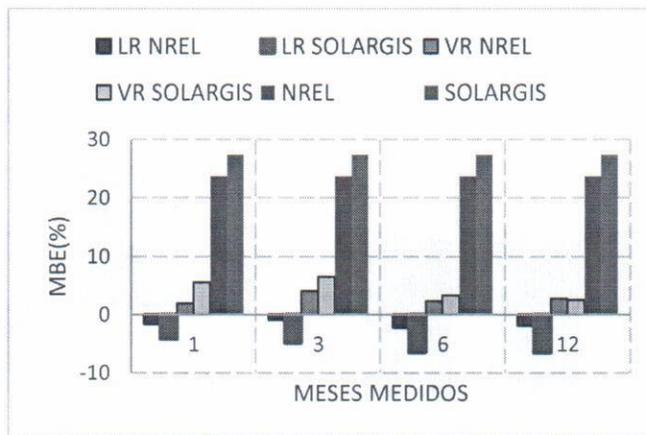


Figura 23. MBE vs Cantidad de Meses Medidos

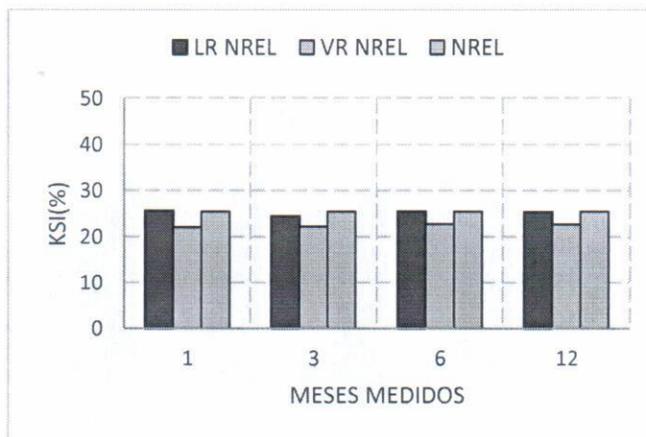


Figura 24. KSI (%) vs Cantidad de Meses Medidos

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.

4.2.5. UTM – Santa Marta

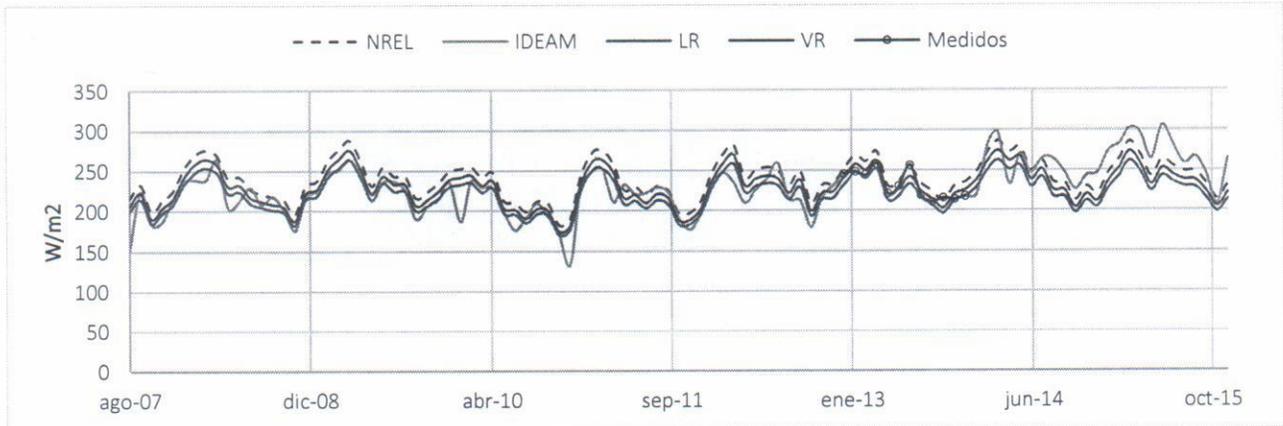


Figura 25. Resultado de la reconstrucción para la estación de Santa Marta

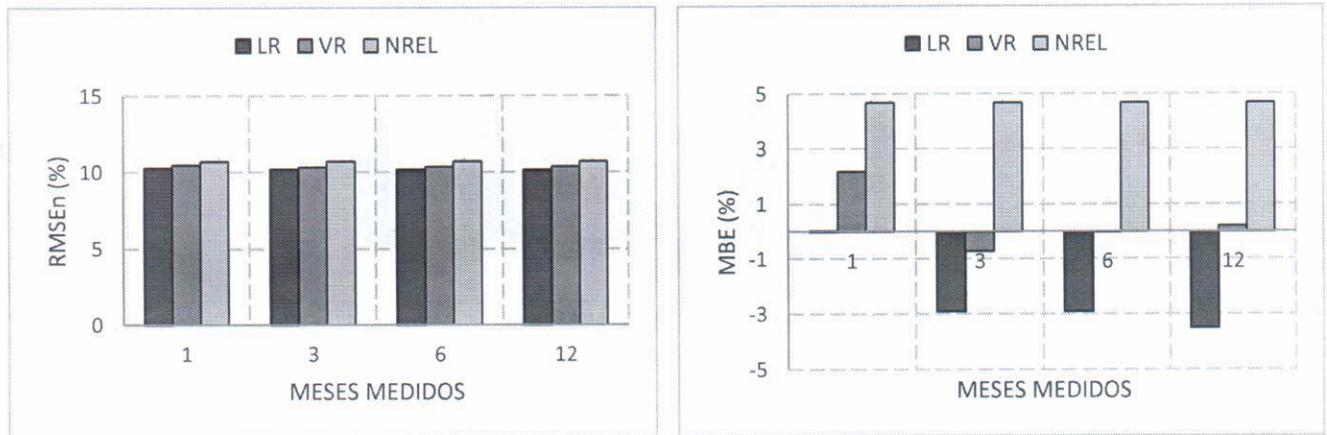


Figura 26. RMSE y MBE vs Cantidad de Meses Medidos

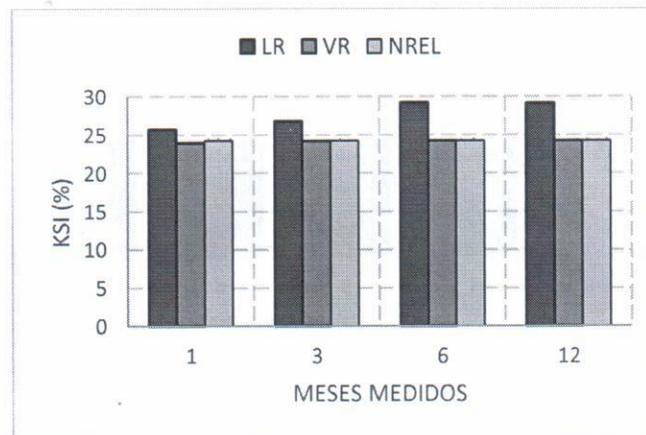


Figura 27. KSI (%) vs Cantidad de Datos Medidos

4.2.6. San Marcos – Sucre

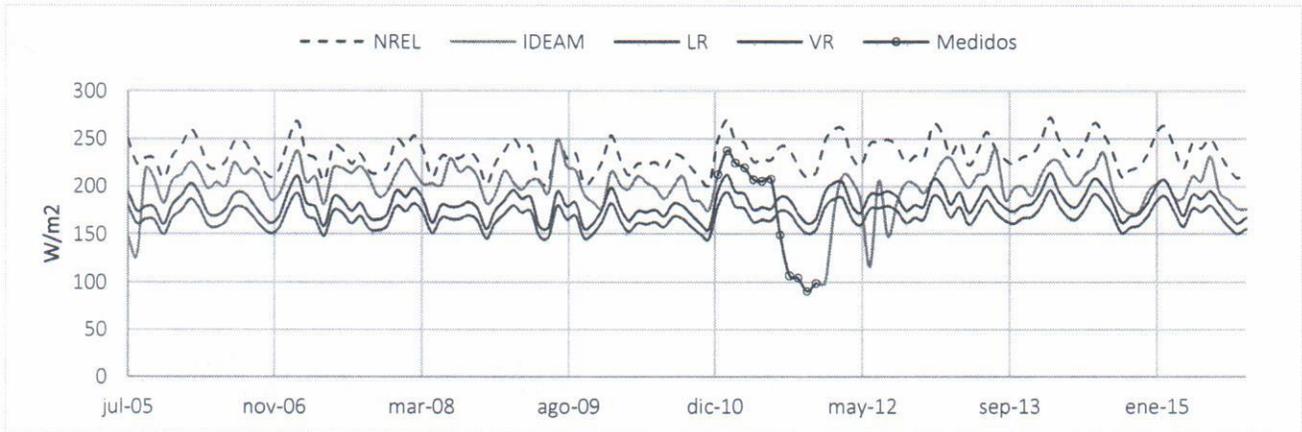


Figura 28. Resultado de la reconstrucción para la estación de Sucre

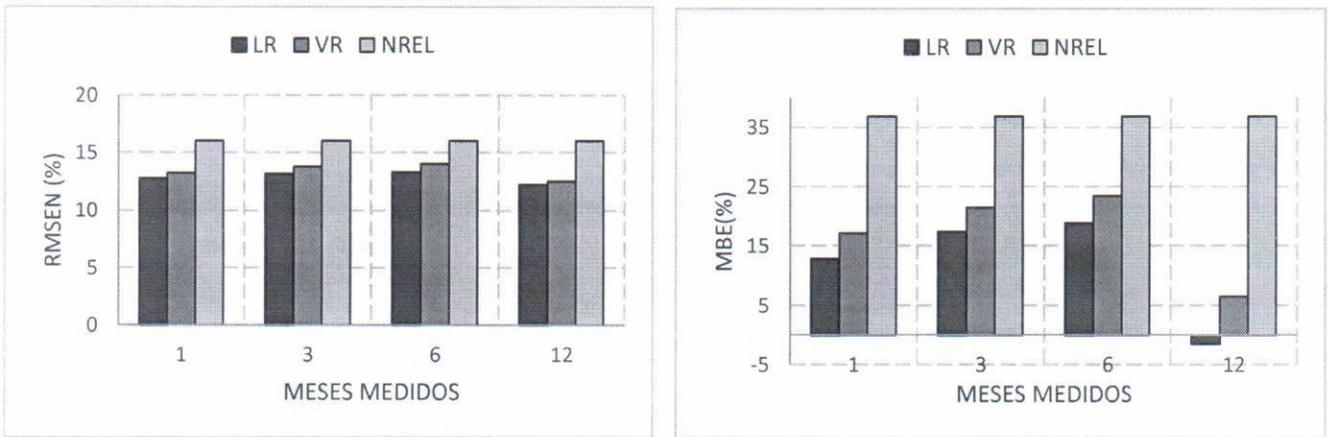


Figura 29. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

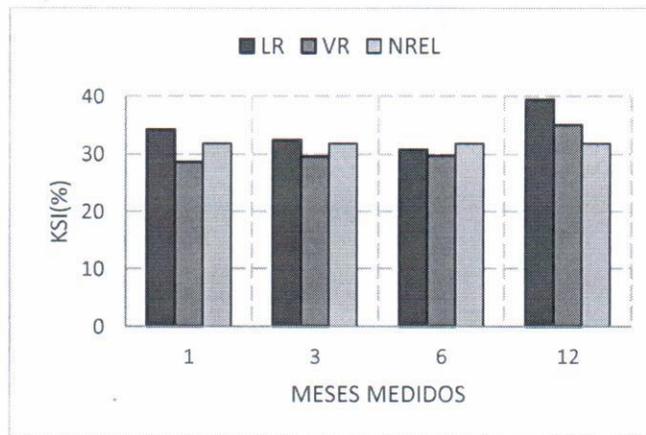


Figura 30. KSI(%) vs Cantidad de Datos Medidos

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).

4.2.7. Uribia – La Guajira

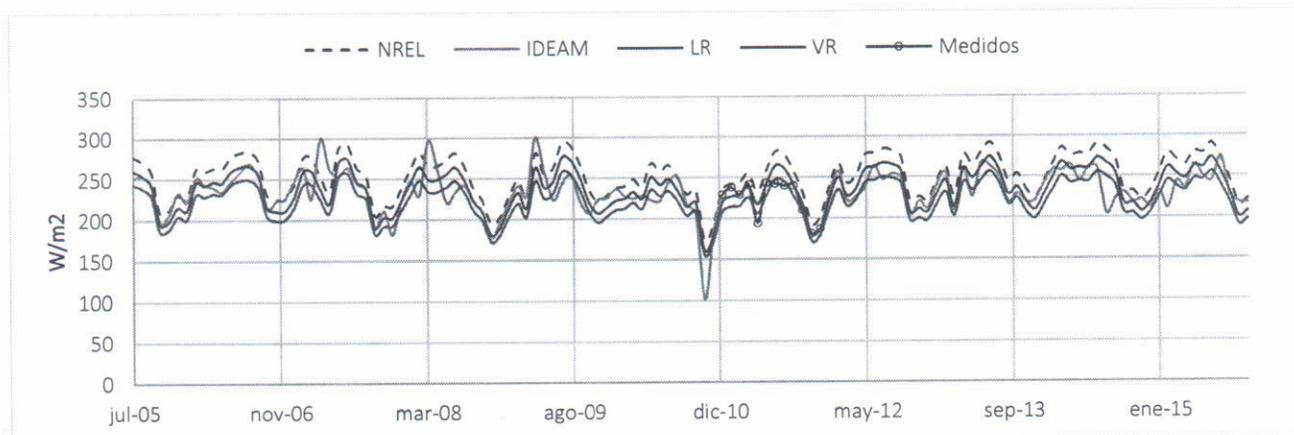


Figura 31. Resultado de la reconstrucción para la estación de La Guajira

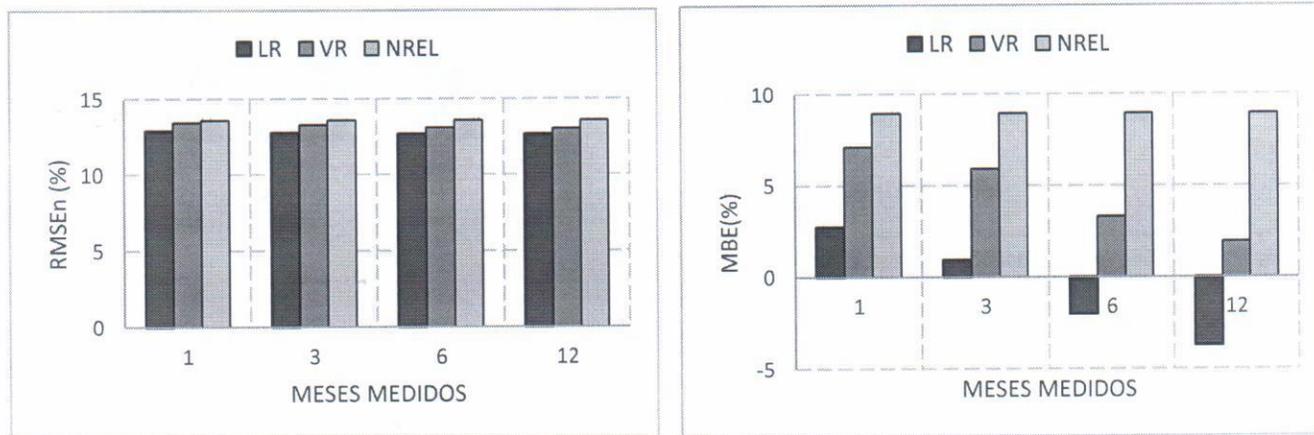


Figura 32. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

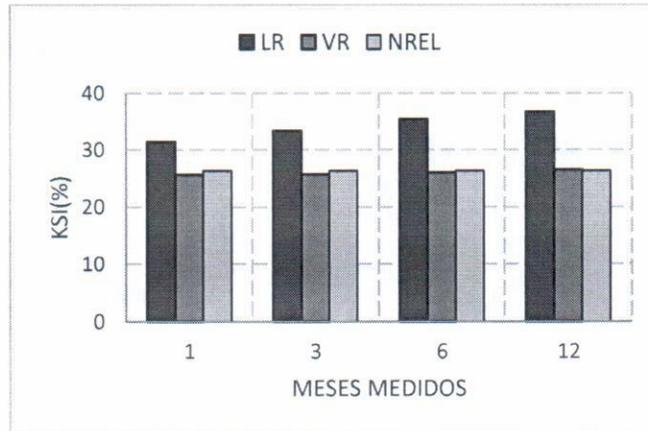


Figura 33. KSI(%) vs Cantidad de Datos Medidos.

Para esta ubicación también se puede observar una disminución en los dos primeros indicadores y un comportamiento similar en el tercer indicador, nuevamente el método 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.

4.2.8. Fedearroz – Valledupar

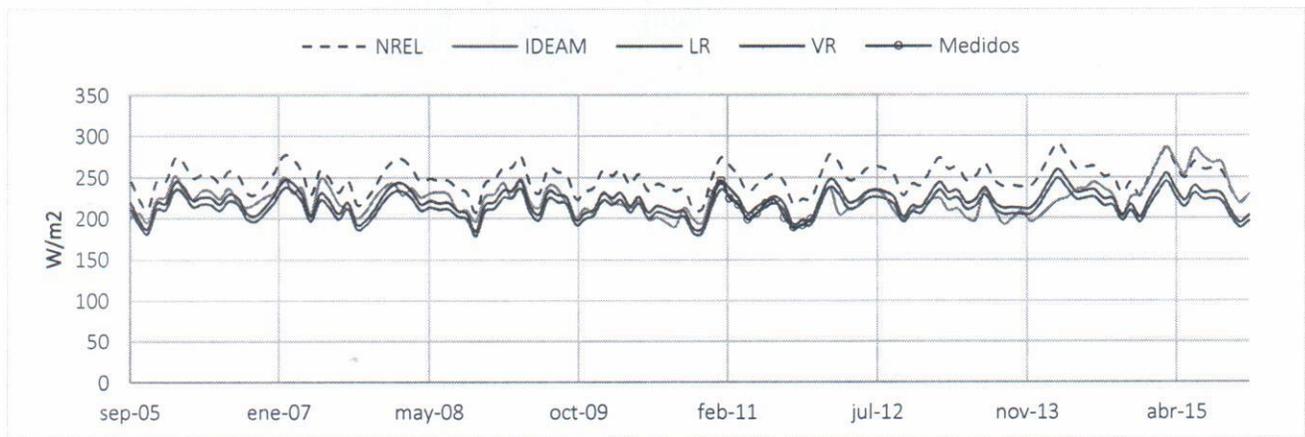


Figura 34. Resultado de la reconstrucción para la estación de Valledupar.

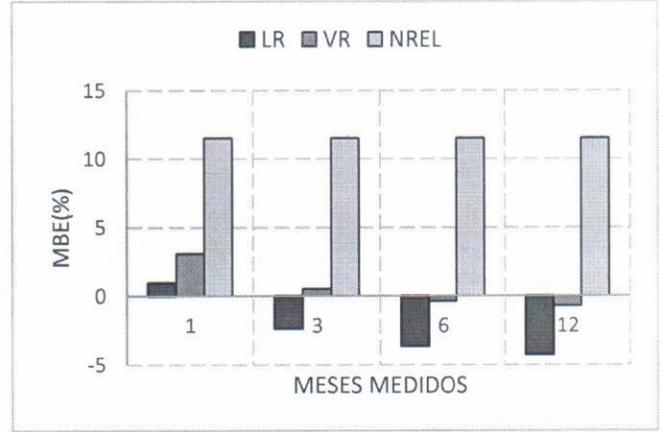
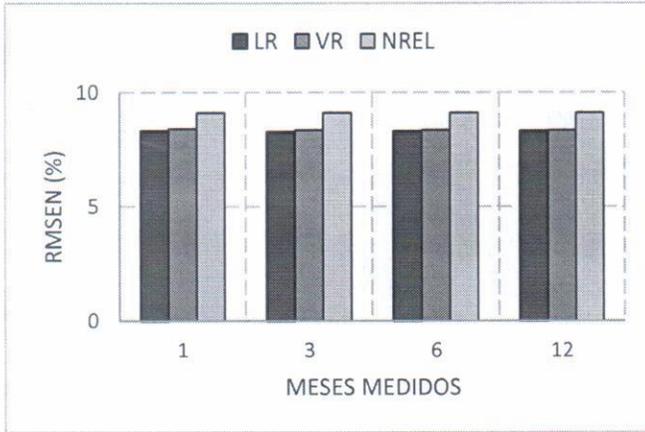


Figura 35. RMSE y MBE vs Cantidad de Datos Medido

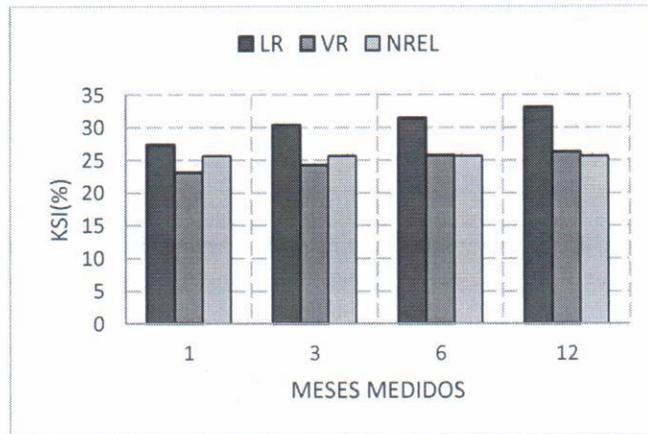


Figura 36. KSI (%) vs Cantidad de datos medidos

De acuerdo con los resultados presentados, se puede ver que el método de ajuste MCP basado en la relación de varianzas es el más efectivo para reducir el error de sesgo (MBE). En todos los casos para un tiempo común de 12 meses, se logró un error de sesgo dentro del rango +/-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 recomienda contar, como mínimo, con un año de medición en el sitio.

5. PROTOCOLO

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 irradiancia solar horizontal y temperatura ambiente, así como la metodología para la verificación, construcción y ajuste de series de tiempo para las mismas variables.

5.1. Requisitos mínimos para la medición de irradiancia solar y temperatura ambiente

5.1.1. Medición

La selección, utilización y calibración de los instrumentos para la medición de las variables meteorológicas está estandarizada en el documento de la WMO – Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación (Edición 2014) [9]. 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 Irradiancia Solar Horizontal y Temperatura Ambiente, haciendo énfasis en que es necesario seguir las normas y recomendaciones establecidas para cada variable.

Para la medición de la irradiancia solar horizontal (GHI) se debe utilizar un piranómetro de Patrón Secundario o estándar superior según la clasificación en la norma ISO 9060, en su defecto se puede utilizar un piranómetro de Primera Clase, aunque con una posible degradación de la precisión y exactitud de los datos. Se debe contar con un reporte de calibración (o comparación con un patrón aceptado para dicha aplicación) durante la puesta en operación del instrumento, dicha calibración debe comprobarse como mínimo cada dos años. Los reportes de calibración deben estar disponibles para revisión por parte del dictaminador técnico.

La instalación del piranómetro se basa en las recomendaciones de la sección 7.3.3.2 de la guía de la WMO [9]. De manera general el instrumento se ubica sobre una superficie horizontal, 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 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 a lo establecido en el manual del usuario del instrumento.

Para la medición de la temperatura ambiente se recomienda el uso de Termómetros de Resistencia Eléctrica, Termómetro Termistor o Termómetro Termopar, los requerimientos que estos termómetros deben cumplir se encuentran en la Tabla 3 de este documento. Las designaciones para la calibración de dichos instrumentos se encuentran en la sección 3.4 y los reportes de calibración deben estar disponibles para revisión por parte del dictaminador técnico.

El termómetro debe estar instalado en una garita, 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 1.25 y 2 m.

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 de acuerdo con la norma IEC 61724-1 vigente. Cada grupo de instrumentos debe tener su propio *datalogger* para evitar un punto de falla centralizado, que pueda causar pérdida de información. 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 (Irradiancia Global Horizontal 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 irradiancia directa y difusa. Este tipo de mediciones son

efectivas para realizar controles de calidad y completar información faltante. Este cálculo se realiza a partir de la siguiente fórmula

$$GHI = DNI \cos \varphi + DHI$$

Donde,

GHI es la irradiancia global horizontal

DNI es la irradiancia normal directa

DHI es la irradiancia global difusa

φ es el ángulo correspondiente al zenith

El sistema de adquisición debe estar configurado para almacenar información, como mínimo cada diez (10) minutos. La frecuencia de muestreo se configura dependiendo del tiempo de respuesta del instrumento y las características del *datalogger*.

Se debe realizar control de calidad de los datos obtenidos. Estos pueden incluir controles automáticos y visuales, como los descritos en la sección 3.5. Los datos que no cumplan los controles de calidad deben ser separados y analizados en detalle, los que si, son agregados y archivados en **resolución horaria como mínimo**.

Se establece como requerimiento realizar comparaciones respecto a un patrón aceptado para dicha aplicación cada dos años, de encontrarse errores de sesgo superiores al 5% será necesario calibrar el sensor de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, o un ente competente certificado por el INM (Instituto Nacional de Metrología de Colombia). Adicionalmente, se debe reportar el registro de las actividades de limpieza y mantenimiento de los equipos de medición según lo establecido en los manuales de operación de los instrumentos. Estas deben incluir actividades de limpieza, mantenimiento y revisión general de los sistemas de medición y adquisición de datos. Estos registros serán verificados por el dictaminador técnico.

5.1.2. Llenado de datos

Para llenar vacíos que puedan existir en las mediciones en tierra, se utiliza la metodología planteada a lo largo de esta sección. Para que el procedimiento propuesto sea efectivo y no genere degradación de la información, **la serie de tiempo medida debe estar completa en por lo menos un 95%**. Adicionalmente se **establece el requerimiento de no tener huecos superiores a 2 semanas continuas**, ya que el método de llenado perdería precisión y se podrían incorporar sesgos adicionales. En el caso de tener más de un año de medición es importante seguir cumpliendo el requisito de no tener vacíos por más de dos semanas continuas, y se debe cumplir igualmente el requisito de tener el 95% de la serie. Si existen huecos inferiores o iguales a dos semanas se puede remitir al literal e del método mencionado más adelante, con el fin de completar su serie.

A continuación, se lista el procedimiento para el llenado de los datos:

- Identificación de vacíos:
 1. Inicialmente se ordenan las series de acuerdo con el año y mes.
 2. Generar una lista de todas las horas que han pasado entre la primera y la última hora de cada serie.
 3. Se encuentra el promedio horario utilizando como parámetros la fecha (día/mes/año) y hora, por si existe más de un dato por hora, volver todo un registro horario.
 4. Se identifica con una marca distintiva las celdas vacías, que serán los huecos de la serie de tiempo en el periodo establecido.

- Llenado de vacíos series Radiación Global Horizontal (GHI):
 1. Partiendo de un análisis gráfico se debe establecer una tendencia estacional, horaria y mensual.
 2. Dado que se identificó que las series de radiación solar tomaban valores de cero (aproximadamente), ello entre las 18:30 y las 06:00, se supone que esto se debe a un error de sesgo en el aparato de medición.

3. Los vacíos en el horario de 18:30 a 06:00 se toman como cero, esto por el supuesto anterior y por qué en esta franja horaria no hay radiación solar.
4. Para los demás horarios se aplica el siguiente algoritmo:
 - a. Identificar la media de cada grupo de datos. Como se nombró anteriormente, estos grupos son formados por los datos de cada hora (06:00- 18:30) de un mes en el mismo año. Ej: Un grupo de datos serán los datos de las 09:00 del mes de junio del 2010.
 - b. En estos mismos grupos de datos, se identifica la distribución que se maneja y con esto se calcula un factor de dispersión medio para el grupo.
 - c. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en alguna semana algún horario no tiene ni si quiera un dato.
 - d. Si se presenta la situación nombrada en el literal c, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes de la semana anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos del 8 de junio del 2014 a las 10:00, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de las 10:00 de la mañana anterior y siguiente a esta fecha. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - e. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en algún mes algún horario no tiene ni si quiera un dato. Situación bastante frecuente en especial en las bases de datos con vacíos de más de 12 meses consecutivos.
 - f. Si se presenta la situación nombrada en el literal e, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes del año anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos a las 10:00 de junio del 2014, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de las 10:00 de junio del 2013 y del 2015. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - g. Verificar que se cuenta con todas las medias y desviaciones para cubrir el intervalo de la serie.
 - h. Se genera un número para llenar los vacíos. Este se genera dentro de un intervalo de confianza que tiene como media, la media del grupo de ajuste de los datos, cuyos extremos son la media \pm la desviación de este. Ej: Si se desea generar un dato de las 15:00 de Marzo de 2017, y tenemos que para ese grupo de ajuste la radiación es X y la desviación es Y , se genera un número aleatorio en el intervalo $[x-y ; x+y]$.
5. Como prueba de funcionamiento del algoritmo, se almacenan los datos de media y desviaciones previas al llenado y se comparan con los datos "post-llenado", para ver que no haya variaciones significativas. En los casos donde el grupo de datos no está vacío por completo, se toma como representativo una variación del 10% en los indicadores. En los grupos totalmente vacíos no se puede definir un % de variación, ya que no hay dato real contra el cual compararlo.

- Llenado de vacíos series Temperatura Ambiente:

1. Partiendo de un análisis gráfico, establecer una tendencia estacional, horaria y mensual.
2. Para el llenado aplica el siguiente algoritmo:
 - a. Identificar la media de cada grupo de datos. Como se nombró anteriormente, estos grupos son formados por los datos de cada hora de un mes en el mismo año. Ej: Un grupo de datos serán los datos de las 09:00 del mes de junio del 2010.
 - b. En estos mismos grupos de datos, identificar la distribución que se maneja y con esto establecer un factor de dispersión medio para el grupo.
 - c. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en alguna semana algún horario no tiene ni si quiera un dato.
 - d. Si se presenta la situación nombrada en el literal c, se debe llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes de la semana anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos del 8 de junio del 2014 a las 10:00, se aproxima usando un promedio de la media de los datos de las 10:00 de la mañana anterior y siguiente a esta fecha. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.

- e. Identificar si hay grupos de datos sin información. Es decir, si en algún mes algún horario no tiene ni si quiera un dato. Situación bastante frecuente en especial en las bases de datos con vacíos de más de 12 meses consecutivos.
 - f. Si se presenta la situación nombrada en el literal e, se procede a llenar esta información tomando los datos de media y desviación promedio de este horario en el mes del año anterior y siguiente. Ej: si no tenemos datos a las 10:00 de junio del 2014, aproximaremos usando un promedio de la media de los datos de las 10:00 de junio del 2013 y del 2015. Lo mismo para la desviación. **Nota:** al ser desviaciones no es un promedio directo, es un promedio estadístico.
 - g. Verificar si se cuenta con todas las medias y desviaciones para cubrir el intervalo de la serie.
 - h. Se genera un número para llenar los vacíos. Este se genera dentro de un intervalo de confianza que tiene de media, la media de su grupo de datos cuyos extremos son la media \pm la desviación de este. Ej: Si se desea generar un dato de las 15:00 de marzo de 2017, y tenemos que para ese grupo de datos la radiación es X y la desviación es Y, se genera un número aleatorio en el intervalo $[x-y; x+y]$.
3. Como prueba de funcionamiento del algoritmo, se almacenan los datos de media y desviaciones previas al llenado y se comparan con los datos "post-llenado" para ver que no haya variaciones significativas. En los casos donde el grupo de datos no está vacío por completo, se toma como representativo una variación del 10% en los indicadores. En los grupos totalmente vacíos no se puede definir un % de variación, ya que no hay dato real contra el cual compararlo.

Se debe contar con al menos un año de mediciones continuas en sitio, siguiendo el protocolo establecido en esta sección, y las mediciones deben realizarse a no más de 10 km de distancia del sitio del proyecto. En territorios con geografías que cambian muy poco en grandes extensiones, se puede considerar la utilización de mediciones a mayor distancia, ello con el visto bueno del dictaminador técnico. Es importante recalcar el requerimiento de información para periodos completos de un año (1), lo cual asegura la correcta aplicación de la metodología de verificación y ajuste de series de tiempo. En general el error de sesgo se corrige a partir de los valores promedio, para el modelo aquí propuesto se tiene en cuenta adicionalmente la desviación estándar del periodo común de las series. De esta forma, en el caso en el que se tome información para fracciones de un año, e. g. 1 año y 6 meses, los valores de ajuste se verán afectados por el tipo de clima correspondiente a los seis meses incluidos. Es decir que, si aquellos 6 meses corresponden a una temporada de verano, la corrección podría incluir un error de sesgo que sobreestime el recurso, si por el contrario dichos periodos corresponden a una temporada de invierno, los factores de ajuste podrían subestimar el recurso. De esta forma se hace específico el requerimiento de información completa para múltiplos de 1 año. Las mediciones pueden iniciar en cualquier mes, siempre y cuando se aporte información para 12 meses calendario.

Si se cuenta con información medida en sitio superior a un (1) año e inferior o igual a cuatro (4) años, se mantiene el porcentaje de datos faltantes admisible reportado anteriormente, como 5% y 2 semanas como el límite permitido de información continua faltante. Por ejemplo, para dos (2) años de información serían admisibles datos faltantes equivalentes a 36.5 días en resolución horaria. Adicionalmente, estos no podrán pertenecer a más de dos semanas continuas de información en ningún caso. 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.

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

1. Las recomendaciones y estándares internacionales [5, 2], establecen que las series de tiempo históricas de GHI y Temperatura Ambiente 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 horaria. Para dar cumplimiento a los requerimientos de la resolución CREG 243 de 2016, se debe tener una duración mínima de 10 años
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), valores que garantizan un buen ajuste de los datos. El anterior análisis garantiza que el modelo satelital esté capturando de manera razonable las condiciones meteorológicas en tierra.

3. Una vez se determina la correlación de los datos, se debe aplicar el método Medición-Correlación-Predicción (MCP) basado en la proporción 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 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 37. Este algoritmo se encuentra automatizado en un aplicativo actualmente en desarrollo 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.

Es importante mencionar que este procedimiento se podrá aplicar con la información de fuentes satelitales, y también de otras estaciones. Lo anterior, solo si la estación de referencia se encuentra a menos de 10 km de distancia del emplazamiento del proyecto de generación, y cumple las condiciones de medición, llenado, verificación y ajuste de datos de este protocolo. Adicionalmente, se podrán combinar fuentes de información (datos satelitales y estación de referencia), ello para conseguir la longitud de la serie de largo plazo (10 años).

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 23 y 24 de la resolución CREG 243 de 2016, 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_{ref} : 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
 $y = mx + b$ (Modelo lineal)

Donde:

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

Finalmente:

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

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
   $\mathcal{L}$  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
```

Figura 37. Metodología para verificación y reconstrucción de series históricas.

6. 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 243 de 2016,» Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá, 2016.
- [9] WMO, «Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation,» World Meteorological Organization, Switzerland, 2014.
- [10] IEA SHC, «Task 46: Best Practices for Solar Irradiance Measurements with Rotating Shadowband Irradiometers,» *IEA SHC Solar Update Newsletter*, vol. 62, pp. 15-68, 2015.
- [11] 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.
- [12] «Hukseflux,» 2017. [En línea]. Available: https://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SR20_manual_v1713.pdf.
- [13] E. Riley, «Sandia,» 2013. [En línea]. Available: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/50-Riley-Standards-for-Acceptance-Testing-and-Model-Validation_ERiley.pdf0Xq.pdf.
- [14] EPLAB, «ISO 9060 Pyranometer Classification,» [En línea]. Available: http://www.eppleylab.com/wp-content/uploads/2016/09/pyranometer_specifications.pdf.
- [15] NREL, «Monitoring System Performance,» Febrero 2011. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50643.pdf>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [16] 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.
- [17] 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&usq=AFQjCNHmnyGes9MgdMTA34NopkHRPSO8OQ.
- [18] hukseflux, «USER MANUAL SR20, Secondary standard pyranometer,» 2017. [En línea]. Available: https://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SR20_manual_v1713.pdf. [Último acceso: Agosto 2017].

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] C. Thuman, M. Schnitzer y P. Johnson, «QUANTIFYING THE ACCURACY OF THE USE OF MEASURE-CORRELATE-PREDICT METHODOLOGY FOR LONG-TERM SOLAR RESOURCE ESTIMATES,» 2012.
- [22] R. Meyer, J. Torres, G. Marquardt, M. Schwandt, N. Geuder, C. Hoyer-Klick, E. Lorenz, A. Hammer y H. Beyer, «Combining solar irradiance measurements and various satellite-derived products to a site-specific best estimate,» de *SolarPACES Symposium*, Las Vegas, 2008.
- [23] D. Myers, «Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality,» *Energy*, vol. 30, pp. 1517-1531, 2005.
- [24] M. Suri y T. Cebecauer, «Requirements and Standards for Bankable Dni Data Products in Csp Projects,» de *Proceedings of the SolarPACES Conference*, Granada, 2011.
- [25] T. Mieslinger, F. Ament, K. Chhatbar y R. Meyer, «A new method for fusion of measured and model-derived solar radiation time-series,» de *SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, Freiburg, 2014.
- [26] G. Bender y C. Gueymard, «THE ROAD TO BANKABILITY: IMPROVING ASSESSMENTS FOR MORE ACCURATE FINANCIAL PLANNING,» de *Solar 2011 Conf*, Raleigh, 2011.
- [27] C. Gueymard, W. Gustafson, G. Bender y A. S. P. Etringer, «Evaluation of procedures to improve solar 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.
- [28] A. Rogers, J. Rogers y J. Manwell, «Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, nº 3, pp. 243-264, 2005.
- [29] J. Carta, S. Velázquez y P. Cabrera, «A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 362-400, 2013.
- [30] Y. Rochtus, «Filling vacíos in time series in urban hydrology,» pp. 1-11, 2014.
- [31] N. V. D.Papale, «Filling the vacíos in meteorological continuous data measured at FLUXNET sites with ERA-Interim reanalysis,» pp. 157-171, 2015.
- [32] F. A. P. & M. S.Kandasamy, «A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations- applications to MODIS LAI products,» pp. 4055-4071, 2013.
- [33] A. Derrick, «Development of the measure correlate predict strategy for site assessment,» de *BWEA*, UK, 1992.
- [34] «Manual of the Global Observing System,» de *Manual of the Global Observing System*, Suiza, 2003, pp. III-18.
- [35] NOAA, «Climate.gov,» National Oceanic and Atmospheric Administration , 30 Agosto 2009. [En línea]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>. [Último acceso: 4 Septiembre 2017].
- [36] 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 energía firme de una planta solar,» 2016.