

AVANCES EN LA EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN CHILE

Rodrigo Escobar Moragas – rescobar@ing.puc.cl

Alberto Ortega Alonso – aortegaa@ing.puc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalurgia

Samuel Luna de Abreu – abreu@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina IFSC

Enio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

Fernando Ramos Martins - fernando.martins@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE

Resumen. Este reporte actualiza artículos previos respecto del estado de la evaluación del recurso solar en Chile, presentando los avances realizados durante los últimos dos años. De este modo, se presenta una nueva red de estaciones de monitoreo que tiene por objeto cumplir con los estándares de operación de BSRN (Baseline Surface Radiation Network), que está siendo desplegada en el país por los autores de este artículo, para proveer de datos de buena calidad a investigadores, desarrolladores y legisladores, así como una segunda red de estaciones del tipo RSBP para obtener información de lugares remotos o aislados. Este artículo presenta además resultados y comparaciones para cuatro fuentes de datos disponibles y una validación parcial del modelo Chile-SR de estimación de recurso solar con información satelital, donde se observa que aparentemente el modelo es capaz de estimar adecuadamente la radiación solar para climas templados, aunque es necesario un mayor refinamiento de la metodología en otros climas, mejorando la estimación de la cobertura efectiva de nubes y la modelación de los aerosoles atmosféricos. A continuación se describe cada base de datos de medición disponibles públicamente y luego se presenta el modelo Chile-SR, para finalizar con una comparación entre los datos de las distintas fuentes. En general como conclusión, el trabajo de los autores muestra que existen para Chile algunas bases de datos públicas con mediciones, un modelo de simulación climático, y datos estimados con información satelital, ninguno de los cuales es por ahora completamente válido, motivando la evaluación nacional del recurso solar.

Palabras clave: Energía Solar, Estaciones Solarimétricas, Chile-SR.

1. INTRODUCCIÓN

La promoción de las energías renovables en Chile ha obtenido apoyo institucional a través de una ley que establece que el 10% de la energía eléctrica debe ser generada con energías renovables al año 2024, y con anuncios realizados por el gobierno que este porcentaje podría aumentar a un 20% el 2020, creando interés en introducir las energías renovables en los sistemas de generación eléctrica del país, anunciándose algunos proyectos que incluyen sistemas fotovoltaicos, solares de concentración, y plantas para proveer calor a escala industrial. Sin embargo, aún existen barreras debido a la falta de bases de datos solares validadas y adecuadas para la simulación de sistemas y actividades de planificación. Artículos publicados anteriormente (Ortega et al, 2009 and 2010) identifican algunas bases de datos de radiación solar disponibles para Chile, encontrado que existe una desviación significativa entre ella, y que algunas que cuentan con mediciones en terreno poseen niveles de incertidumbre desconocidos. A pesar de todo, estas permiten inferir que el país posee altos niveles de radiación que podrían ser adecuados para actividades de planificación energética, aunque los datos no son adecuados para el diseño y dimensionamiento de plantas solares. Esto hace evidente y necesaria una iniciativa a largo plazo que evalúe el recurso solar a lo largo del país.

De este modo se puede mencionar que existen principalmente dos metodologías para obtener datos de radiación solar para grandes extensiones de territorio, una utiliza una red de estaciones de medición y métodos de interpolación, y otra estima la radiación incidente en la superficie terrestre utilizando modelos de transferencia radiativa atmosférica e información satelital. Las mediciones realizadas con piranómetros y asociadas a un punto, típicamente presentan bajos niveles de incertidumbre, sin embargo se ha demostrado que al ser interpolados entre estaciones que distan más de 35Km estos niveles resultan más altos que el de las estimaciones satelitales (Perez et al 1997, Zelenka et al 1999). En el último Atlas Solar de Brasil (Pereira et al. 2006), se combinan ambas técnicas para obtener datos con niveles reducidos de incertidumbre, mostrando ser una técnica adecuada para evaluar y producir mapas continuos de distribución del recurso solar sobre grandes áreas, con baja incertidumbre.

Por otro lado la información debe abarcar un período de tiempo adecuado, ya que la variabilidad temporal de la irradiancia solar indica que con un set de datos de 5 años se puede determinar un nivel de radiación promedio a largo plazo con un grado de precisión suficiente, e incertidumbre menor al 10%, pero no contiene información suficiente para representar la variabilidad inter anual adecuadamente. Un set de datos con 15 años de mediciones, muestra patrones y tendencias de la variación interanual, y aunque no sigue una curva de distribución estadística es posible obtener un promedio preciso con incertidumbre menor al 5%, tal como se menciona en Pitz-Paal (2007), y con series de 30 años es posible describir con alto grado de confianza estadística las características de recurso solar (Oregon University, 1999).

Los actuales esfuerzos en evaluación del recurso solar en Chile, apuntan a producir a largo plazo bases de datos que satisfagan las condiciones previamente declaradas, para lo cual dos nuevas redes de estaciones de monitoreo está siendo implementada en el país desde 2010 por los autores de este artículo. Una tiene como objetivo cumplir con los estándares internacionales de la BSRN (Baseline Surface Radiation Network), para proveer a investigadores,

desarrolladores y legisladores de datos de alta calidad, y una segunda red de estaciones compuestas por dispositivos del tipo *rotating shadowband radiometer* (RSBR), para proveer información de localizaciones de interés más remotas, como lugares de gran altitud, salares, terrenos con cubierta de nieve y otros. Además, existe otra red de estaciones implementada por una agencia del gobierno, utilizando métodos no estandarizados que han introducido incertidumbre en las mediciones, debiendo ser reprocesadas para determinar su incertidumbre y mejorar en el cálculo de radiación directa normal incidente (DNI).

Por otra parte, un nuevo modelo que utiliza información satelital está siendo desarrollado por los autores, el modelo Chile-SR, que ha sido construido en base al modelo Brazil-SR, con contribución de investigadores del *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE) de Brasil, modificando este último para introducir una metodología diferente en el tratamiento de las variables climáticas y geográficas, y el procesamiento de la cobertura efectiva de nubes.

En este artículo se presenta resultados y comparaciones para las cuatro fuentes de datos mencionadas y una validación parcial del modelo Chile-SR, donde se observa que en apariencia el modelo es capaz de estimar adecuadamente la radiación. Además se describe cada base de datos de estaciones de medición disponibles públicamente, para luego describir el modelo Chile-SR, y finalizar con una comparación entre los datos provenientes de las distintas fuentes.

2. DATOS DISPONIBLES

Aquí se considera que los datos de radiación solar para Chile están disponibles públicamente, si cumplen las siguientes condiciones: la base de datos es conocida, para tener acceso a ella no debe ser pagada una tarifa, y se puede acceder a la información a través de un sitio web o tomando contacto directo con quien posee de los datos. En Chile existen algunas bases de datos públicas, como la pertenecientes a Dirección Meteorológica de Chile (DMC), a la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) en el Archivo Nacional Solarimétrico (ANS), en la Comisión Nacional de Energía (CNE) en colaboración con la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y en la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC) en colaboración con el Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF).

La DMC opera una red de 18 estaciones meteorológicas que contienen piranómetros, cubriendo un período desde 1988 a la fecha. El ANS contiene mediciones en terreno en 89 puntos a lo largo de Chile, incluyendo datos desde principios de 1961; la red GIZ-CNE está compuesta por 7 estaciones de medición que han sido instaladas desde 2008, mientras que la red UC-FONDEF posee 5 estaciones estándar BSRN y 7 del tipo RSBR, todas en funciones aproximadamente desde mediados de 2010.

2.1 Datos del Archivo Nacional Solarimétrico (ANS)

La base de datos del Archivo Nacional Solarimétrico, está ubicado en la UTFSM, en Valparaíso y en general cuenta con series de mediciones discontinuas, que abarcan períodos de solo 3 meses hasta 21 años (Cáceres, 1984). Estos archivos incluyen datos de 89 puntos con años completos e incompletos de mediciones, pero la información posee altos niveles de incertidumbre asociada a la discontinuidad y los períodos de medición, que de hecho no se ha podido determinar (Yilmaz et al, 2007). A esto se suma la incertidumbre inherente a los actinógrafos y heliógrafos usados para realizar las mediciones y al operador que manualmente medía e integraba las series para producir los datos, tal como se ve en la Fig. 1 (derecha). Desafortunadamente tampoco existen registros de la operación y mantención de ninguno de estos instrumentos, haciendo imposible evaluar el estado de su calibración, operación y condición del instrumento.

La información está disponible de dos formatos: datos publicados en tablas en un libro que abarca desde 1961 a 1983 (Sarmiento, 1984), y datos no procesados disponibles a petición directamente en el ANS.



Figura 1 – Actinógrafos del ANS (izquierda) y el Sr. Robero Sotta (dercha) de la UTFSM, revisando mediciones.

Los datos procesados incluyen medias mensuales para cada localización y una serie horaria realizada para un día meteorológico típico de cada mes. En el libro señalado, no se hace mención a ninguna metodología estadística utilizada para obtener las medias mensuales ni tampoco se describe el modelo utilizado para construir las series horarias. Los datos no procesados incluyen valores horarios para el período en que cada estación estuvo activa, y pueden ser entregados en formato digital. Estos datos han sido procesados por los autores, en colaboración con el ANS, determinando promedios de largo plazo, tendencias, medias mensuales, y años típicos, resultados que están próximos a ser publicados.

2.2 Datos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC)

La DMC posee series de datos de piranómetros en estaciones meteorológicas, cubriendo las principales zonas climáticas de Chile. En 2011 se reportó un total de 18 estaciones meteorológicas con piranómetros, que en algunas de ellas se encuentran fuera de servicio por problemas de costos de mantenimiento y de otras han sido cambiados de ubicación. Los datos son de acceso público y pueden conseguirse directamente a través del sitio web de la DMC (www.meteochile.cl), pagando una pequeña tarifa para cubrir costos de procesamiento. Los piranómetros con que datos fueron obtenidos cubren un rango espectral de 0.285 a 2.8 μm , siendo integrados en intervalos cada 10 minutos, presentándose la irradiancia horaria (Wh/m^2) de donde la irradiación (W/m^2) en promedio horario puede obtenerse fácilmente. Es posible abarcar meses o años completos, tal como lo requiera el solicitante, entregándose los datos en formato digital. Los piranómetros han sido calibrados y mantenidos adecuadamente por el personal de la DMC, quienes son custodios de un pirheliómetro de cavidad absoluta trazable a la referencia mundial en Davos, Suiza.

2.3 Datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE) - Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

Para la evaluación de energías renovables incluyendo el potencial del recurso solar, CNE a través de una cooperación con la agencia alemana GiZ, desde 2008 ha ido desplegando una red de siete estaciones, ubicadas en la parte norte de Chile, en el desierto de Atacama. Las estaciones utilizan tres piranómetros marca Kipp&Zonen modelo CMP11, un sistema de adquisición de datos con un intervalo de muestreo de un segundo, que almacenan promedios cada 10 minutos, y que además miden la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, recibiendo mantención mensual, con personal independiente a ambos organismos.



Figura 2 – Imagen de una estación CNE-GiZ

Las estaciones operan midiendo irradiancia global horizontal con un piranómetro, mientras que los otros dos han sido montados en un sistema de seguimiento en un eje que sigue la elevación solar, diseñando para el montaje de paneles fotovoltaicos. Uno de estos mide la irradiancia global en el plano de seguimiento, y el segundo mide la irradiancia difusa utilizando un sistema no estándar de anillo de sombreado. De esta forma se obtiene la irradiancia directa normal incidente, restando la medición de difusa a la global de estos dos sensores. La Fig. 2 muestra una vista de la estación que se encuentra en San Pedro de Atacama. Las deficiencias de este diseño y operación ha sido discutido en otros artículos (Ortega et al. 2010), donde se argumenta que la validez de las mediciones se encuentran estrictamente restringida, particularmente en lo concerniente a la estimación de la irradiancia directa. Sin embargo, CNE y GiZ han declarado que el objetivo de estas campañas de mediciones, no es la producción de datos de calidad científica, sino la obtención de datos confiables y consistentes, con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre la radiación solar en el norte de Chile.

Los datos de cinco de las estaciones CNE-GiZ han sido reprocesados por el instituto ISE-Fraunhofer, revisándolos y recalculando los datos de DNI para las series en promedios horarios y cada 10 minutos. Así se ha determinado que existe una incertidumbre de $\pm 18.2\%$ para los valores calculados de DNI y $\pm 8.7\%$ para la irradiancia global horizontal. Los reportes de instalación de las estaciones, así como los datos crudos y reprocesados, se encuentran disponibles en el sitio web de la CNE (www.cne.cl), mientras que el estatus de la calibración de los sensores es desconocido.

2.4 Datos de las estaciones PUC-FONDEF

El proyecto de investigación D08i1097 financiado por FONDEF y llevado a cabo por los autores, comenzó en enero de 2010 desplegando una red de 12 estaciones, de las cuales 5 han sido diseñadas y operadas bajo estándar BSRN, y las otras 7 corresponden a tres diferentes configuraciones de *rotating shadowband radiometer* (RSBR). Las estaciones que siguen el diseño BSRN están compuesta por un sistema de seguimiento SOLYS 2 de Kipp&Zonen, con un sistema de alineación automático, y piranómetros CMP11 y CMP21, pirgeómetros CGR6, un pirheliómetro CHP1 y un sensor CUV4 para radiación UV. Adicionalmente cuentan con sensores de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, siguiendo tanto los parámetros BSRN para la adquisición de datos, como para las actividades de mantención.

Los sistemas RSBR pueden tener una de tres configuraciones posibles. Una básica, que incluye un dispositivo RSBR2, compuesto por un sensor Licor200, y un sistema de banda de sombreadamiento automático rotatorio, un sensor de temperatura y humedad relativa, otro de presión atmosférica y un anemómetro para determinar la velocidad y dirección del viento, todo conectado a un sistema CR1000, con una fuente de poder alimentada por un panel fotovoltaico. Una segunda configuración carece de todo sensor meteorológico, y se utiliza en conjunto con una estación de evaluación climática existente. Existe una tercera configuración que es como la básica descrita, con un piranómetro CMP11 adicional, para obtener una medición más precisa de irradiancia global horizontal. Esta configuración se utiliza en lugares donde las condiciones de la radiación son particularmente interesantes y donde se cuenta con personal que puede llevar una rutina periódica de limpieza del sensor CMP11.



Figura 3 – Estaciones RSBR y adicional CMP11 (izquierda); Laboratorio de Evaluación Solar PUC (derecha)

La Fig. 3 muestra una estación RSBR con un sensor CMP11 adicional (izquierda) y el laboratorio de evaluación solar de la PUC (derecha), donde se comparan los instrumentos antes de su instalación en terreno y se mantiene en funcionamiento un sistema que sigue el estándar BSRN.

Las estaciones del proyecto tienen el objetivo de proveer datos que satisfagan estándares internacionales y sus criterios de diseño, operación y mantención, para producir mediciones de alta calidad para el desarrollo de proyectos y políticas energéticas, así como para validar el modelo Chile-SR que se describirá en la sección siguiente. Los certificados de calibración para esta estación son válidos, y está planificado continuar trazándolos a la referencia mundial con la frecuencia correspondiente, al igual que aplicar los algoritmos para analizar la calidad de los datos generados por las estaciones, que han sido transferidos de INPE a la PUC.

2.5 Comparación de las distintas fuentes de datos.

Considerando que al menos existen cuatro fuentes públicas de información de radiación solar, y algunas que no lo son, es razonable y lógico compara los datos entre ellas, para un lugar de interés.

“El Tesoro” ubicado en la región de Antofagasta en el norte de Chile, y es un lugar donde actualmente se están desarrollando proyectos solares. Este lugar posee condiciones excepcionalmente, ya que además de recibir grandes cantidades de radiación es un terreno amplio y llano, con alrededor de 350 días despejados al año, cercano a una faena minera, que consume grandes cantidades de energía. En particular en Chile se considera este lugar como uno de los mejores, para el desarrollo de proyectos de energía solar.

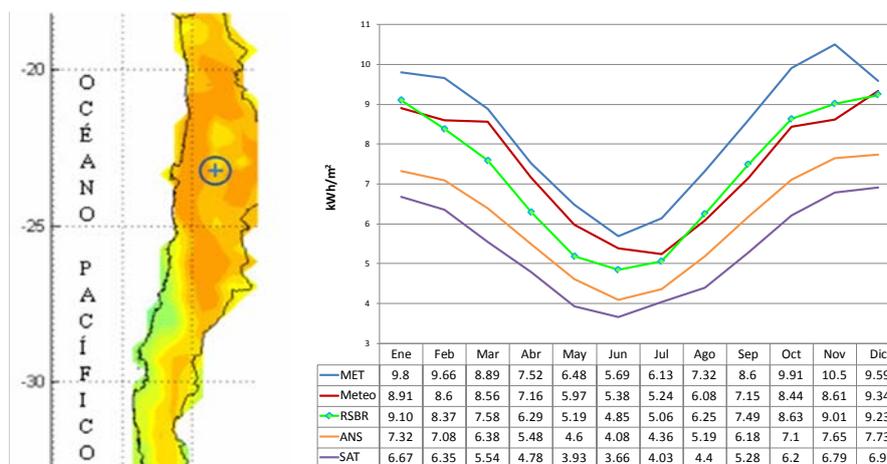


Figura 4 – Ubicación de El Tesoro (izquierda) y comparación de datos solares disponibles para esa ubicación(derecha)

La Fig. 4 muestra una compilación de datos de radiación solar de distintas fuentes, mediciones para “El Tesoro” (MET), incluyendo una serie de datos de 10 años de una estación meteorológica que se encuentra ubicada en el lugar. En la Fig. 4 “Meteo” corresponde a datos del software *Meteonorm*; “RSBR” a los datos producidos por un RSBR en funciones desde 2008; “ANS” se refiere a datos procesados por los autores del Archivo Nacional Solarimétrico, y

“SAT” a estimaciones del modelo GL1.2, derivadas de información satelital para un período desde 1995 a 2005, tal como se describe en Ortega et al 2010.

La imagen izquierda de la Fig. 4 se muestra la ubicación de Tesoro en el norte de Chile, superpuesta a un mapa de los datos “SAT” de la distribución en promedio anual de radiación global horizontal. La información que se encuentra en la Fig. 4 (derecha), corresponde a promedios mensuales de energía solar diaria en kWh/m²/día. Desafortunadamente ni DMC ni la GiZ-CNE poseen alguna estación de evaluación solar cercana a El Tesoro.

La comparación de los datos de las fuentes de información disponibles para el lugar, indica que la radiación global horizontal podría tener valores entre 1960 a 3050 kWh/m²/año. En particular se puede observar que las mediciones más recientes realizadas con un sensor calibrado y mantenido adecuadamente (RSBR), ha producido datos que se ubican claramente en la parte media, entre los datos más altos (MET) y los más bajos (SAT). Tanto ANS y SAT parece subestimar los niveles de radiación, mientras que MET y Meteo, en un menor grado los sobreestiman.

Esta compleja realidad ha motivado a los autores al desarrollo de la iniciativa de evaluación nacional del recurso solar, financiado por FONDEF y conocido como el modelo de estimación satelital Chile-SR.

3. MODELO DE ESTIMACIÓN CON INFORMACIÓN SATELITAL CHILE-SR.

El modelo Chile-SR se ha desarrollado mejorando y modificando el existente para Brasil (Brazil-SR) desarrollado por INPE en el marco del proyecto SWERA. El modelo chileno toma como base el brasileño y lo modifica para crear uno adaptado especialmente a la gran diversidad climática que existe en Chile. En particular la zona norte de Chile, conocida como El Desierto de Atacama, prácticamente posee una ausencia de nubes permanente a lo largo del año, teniendo altos niveles de radiación solar. En la zona central del país, se está en presencia de clima mediterráneo el que da paso a un clima frío y lluvioso en la parte sur de Chile.

Chile es un país largo y angosto, que corre de norte a sur entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes, y que a grandes rasgos es posible dividir en norte/centro/sur y costa/interior/cordillera, componiendo una matriz de nueve regiones climáticas. Por lo tanto, el modelo Chile-SR debe acomodarse a estas condiciones, cada una de las cuales posee distintos perfiles atmosféricos, cubiertas de nubes y topología. El modelo ha sido adaptado específicamente a esta realidad, incluyendo datos climáticos corregidos por altitud (temperatura, humedad relativa, y presión atmosférica), topología y albedo. La información de las imágenes de los satélites GOES de canal visible e infrarrojo, se utiliza como variables de entrada al modelo para determinar la cubierta efectiva de nubes. El algoritmo de transferencia radiativa atmosférica del modelo Chile-SR utiliza prácticamente sin modificaciones el de Brasil, pero con datos climáticos de entrada y la cobertura de nubes adaptados y calculados específicamente para Chile. Como resultado se obtiene una estimación en base horaria de la radiación global horizontal (GHI) y su componente directa normal incidente (DNI).

La Fig. 5 ilustra la secuencia de los principales pasos que sigue Chile-SR para realizar las estimaciones (se muestra el día 25 de enero de 2011 a las 16:40 hrs (UTC-4)). En la imagen del canal visible presenta una dificultad que el equipo de investigación tuvo que enfrentar, tal es la presencia de salares y lugares cubiertos de nieve, que en la imagen parecen nubes. La segunda imagen que se muestra en la Fig. 5 es el canal infrarrojo (IR) que complementa el canal visible dando información sobre la temperatura de cada región. Con la adecuada combinación de ambos canales de información, es posible realizar una clasificación de las nubes, determinándose así si una zona en particular se encuentra despejada (tipo 1 en la fig. 5 *Cloud type*) o nublada (tipo 2, 3 y 4 en la fig. 5 *Cloud type*). El siguiente paso es el procesamiento del tipo de nube, comparando la información instantánea de cada imagen, con una referencia mensual, permitiendo determinar el índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}). Las siguientes dos imágenes de la Fig. 5 muestra el resultado de GHI y DNI obtenidos con el modelo Chile-SR.

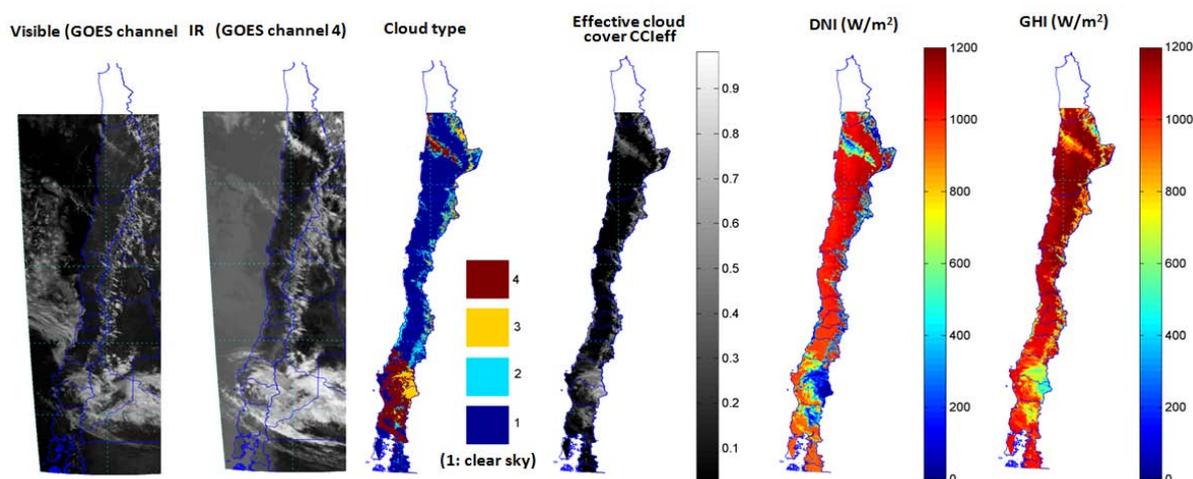


Figura 5 Secuencia que sigue el modelo Chile-SR, para las estimaciones del día 25/01/2011, 16:40 (UTC-4)

Se puede observar que la parte norte de Chile exhibe niveles altos de radiación cercanos a 1200W/m² que van decreciendo con la latitud, mientras que la cobertura de nubes logra bajarlos hasta valores cercanos a 400W/m², fenómeno que se repite con la DNI que presenta valores cercanos a los 1000W/m² en el norte de Chile, viéndose severamente disminuido en presencia de nubes.

Los resultados preliminares del modelo Chile-SR parecen auspiciosos y un avance significativo en la evaluación del recurso solar en Chile, al ser este capaz de adaptarse a las distintas condiciones climáticas presentes en el país. Sin embargo se debe ser cuidadoso mientras se completa el proceso de validación, aunque comparaciones preliminares realizadas con mediciones en terreno con datos PUC-FONDEF son prometedoras. Un análisis más detallado se está llevando a cabo, revelando las potenciales debilidades y fortalezas del modelo.

4. COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS FUENTES DE DATOS

Los datos más recientes que se encuentran para Chile, son los producidos por las estaciones del proyecto CNE-GiZ y el UC-FONDEF, y los derivados del modelo Chile-SR. Aunque naturalmente es deseable realizar una comparación directa entre estas tres fuentes de datos, el hecho de que las estaciones no se encuentren ubicadas en los mismos lugares, evita que esto sea posible. Sin embargo, algunas comparaciones se pueden realizar. A continuación se realiza una comparación entre los datos crudos y procesados de las estaciones de GiZ-CNE, que a su vez son comparados con los de una estación PUC-FONDEF relativamente cercana. Finalmente, se realiza la comparación de los resultados preliminares del modelo Chile-SR con los datos de estaciones PUC-FONDEF proveyendo una validación parcial del desempeño del modelo. Es importante aclarar que ambas redes no tienen relación alguna entre sí, aunque existe un grado de colaboración entre los operadores de ambas, y los esfuerzos y objetivos ambos proyectos no se encuentran coordinados ni están relacionados.

4.1 Comparación de los datos crudos y procesados de las estaciones CNE-GiZ.

Tal como fue descrito las estaciones CNE-GiZ poseen un diseño y configuración que no sigue estándares, propósitos ni buenas prácticas internacionales. El montaje de los sensores para calcular DNI en el sistema de seguimiento de un eje utiliza un sistema de sombreamiento que tampoco es estándar, sin aplicar un factor que corrija o tome en cuenta este hecho. Se aprecia también la carencia de un escudo que bloquee la radiación reflejada por el suelo y la presencia de radiación reflejada hacia el interior del anillo de sombreamiento, por el plano en que los pirómetros están montados. Como se estableció anteriormente, estas estaciones producen datos promedio en intervalos cada 10 minutos y son mantenidos en períodos mensuales. Estas deficiencias restringe fuertemente la validez de las mediciones, al punto que estas han debido ser enviadas al instituto ISE Fraunhofer para ser reprocesadas.

Desafortunadamente, la metodología de reproceso no ha sido publicada, y tan solo se encuentran disponibles series reprocesadas para el período de marzo a septiembre de 2010. La Fig. 6 (izquierda) muestra una comparación entre los datos crudos y los reprocesados para el 21 de septiembre de 2010, en la que se puede observar la diferencia que existe entre ambas, llamadas radiación directa en el plano de seguimiento (DTP) y la estimación de DNI producida por ISE-Fraunhofer con información reprocesada.

Se puede ver que la serie DTP no calza con la DNI, debido a que los instrumentos captan luz desde antes de que el sol aparezca por el Este al amanecer, hasta después de que se oculta bajo el horizonte al Oeste. También se observa que la DNI alcanza valores más altos que la DTP, aunque al integrar ambas series la diferencia en la energía diaria captada es cercana al 5%. Así esto podría ser interpretado como que DTP podría ser un sustituto aceptable de la DNI, aunque una comparación formal con mediciones de un pirheliómetro no ha sido realizada, lo que sería recomendable para llegar a una conclusión referente a la validez de estas series. Otro aspecto es el período de tiempo que abarca tan solo 6 meses, lo que no permite dilucidar su variabilidad anual o hacer un análisis completo de la información. El reprocesamiento de las mediciones aparece como un avance o una mejora en la calidad de la información, pero es difícil argumentar a favor o en contra de esta, ya que no se cuenta con detalles del trabajo realizado, y hasta que el procedimiento sea de conocimiento público, no es posible analizarlo y sería sólo especular pronunciarse sobre la validez de la información.

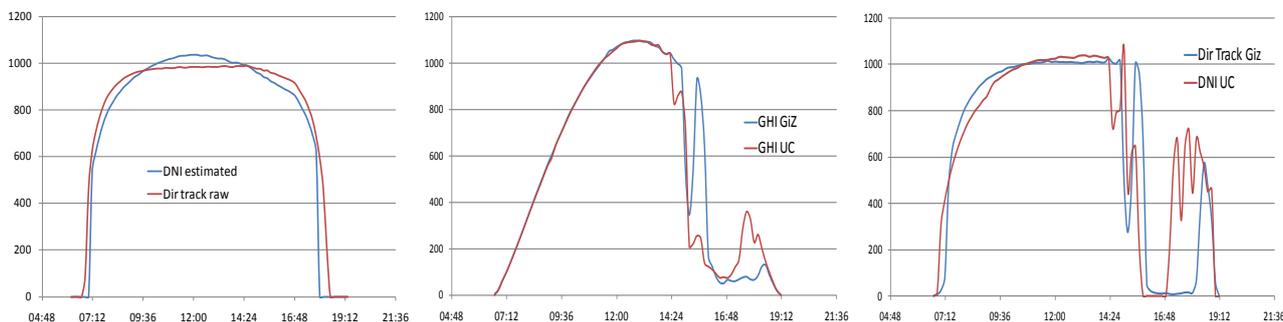


Figura 6 – Comparación de datos en W/m^2 ; CNE-GiZ crudos y reprocesados, para el día 21/09/2010 (izquierda); CNE-GiZ y PUC-FONDEF en San Pedro de Atacama, para el día 01/03/2011 (centro y derecha).

4.2 Comparación entre los datos PUC-FONDEF y GiZ-CNE

Una estación PUC-FONDEF que cuenta con un pirheliómetro y un sistema de seguimiento adecuado, se encuentra localizada a 8 Km de una de las estaciones CNE-GiZ, ambas cercanas a San Pedro de Atacama, en el norte de Chile. Se cree que la distancia entre ambas estaciones es lo suficientemente pequeña como para permitir una comparación que podría ser válida para días claros, al estar ambas en la misma región geográfica y bajo el mismo sistema climático. Además, ambas se encuentran a la misma altitud y distancia de la Cordillera de los Andes. La Fig. 6 (centro) muestra

una comparación entre la GHI producida por ambas estaciones, y la derecha muestra la comparación entre la DTP y la DNI UC medida con pirheliómetro. Desafortunadamente las series de datos producidas con pirheliómetro comenzaron en diciembre de 2010, mientras que las series reprocesadas están disponibles para marzo a septiembre de 2010, por lo que no es posible comparar las tres fuentes de datos disponibles, DTP, DNI reprocesada y DNI UC medida.

Se comparó el día 1 Marzo de 2011, el cual comenzó despejado, para tornarse parcialmente cubierto por la tarde. Para la GHI se observa que desde el amanecer hasta media hora después del medio día solar, permanece claro y que concuerdan de buena manera ambas estaciones. Ambas mediciones son prácticamente iguales, lo que no es sorprendente, ya que ambas estaciones están en la misma área y cuentan con sensores CMP11. Luego, los datos de los niveles de radiación en ambas estaciones comienzan a discordar, indicando la presencia de nubosidad dispersa. Este fenómeno es conocido la época del año y la región con nubosidad que incluso deja precipitaciones en el sector. El fenómeno se denomina “Invierno Boliviano” en alusión a que la nubosidad se origina en el altiplano boliviano.

El hecho de que los datos no concuerden, indica que las nubes que pasan sobre cada estación son de naturaleza local, por lo que la distancia entre las estaciones resulta en que cada una está sujeta a condiciones climáticas específicas que afectan a cada una. Es por esto que las conclusiones más importantes se encuentran en la primera mitad del día, mientras ambas estaciones se encuentran bajo condiciones de cielo claro, donde es posible observar que la DNI-UC en un comienzo es más altas que la DTP, luego se intersecan y DTP pasa a tener valores mayores, para finalmente volver a intersectar y ser nuevamente menores que la DNI-UC. Este comportamiento es diferente al mostrado por la DNI de las series reprocesadas, la cual cruza sólo una vez con la DTP antes del medio día solar. Sin embargo, se debe establecer que esta comparación se encuentra lejos de ser concluyente y lo más prudente sería recomendar una comparación adecuada para establecer su validez. Esa comparación está en proceso bajo un esfuerzo de colaboración entre la GiZ y la PUC, cuyos resultados se espera estén disponibles dentro de algunos meses.

4.3 Comparación entre estimaciones satelitales del modelo Chile-SR y datos de estaciones PUC-FONDEF

La Fig. 7 muestra una comparación entre datos medidos y estimaciones realizadas con información satelital, incluyendo días parcialmente nublados y días claros. Los datos incluyen series producidas con el modelo original Brasil-SR y el modificado Chile-SR. Para hacer la comparación fue seleccionado Enero en Santiago de Chile. Para el día despejado se puede observar que tanto el modelo Brasil-SR como el Chile-SR sobreestiman ligeramente la radiación respecto a las mediciones, siendo Chile-SR el que muestra los niveles más altos. En cambio, para el día nublado, la tanto el modelo Brasil-SR como Chile-SR aparentemente no son capaces de realizar estimaciones que concuerden completamente y en forma precisa con las mediciones, donde el modelo Brasil-SR subestima fuertemente las estimaciones en comparación con los niveles de radiación medidos.

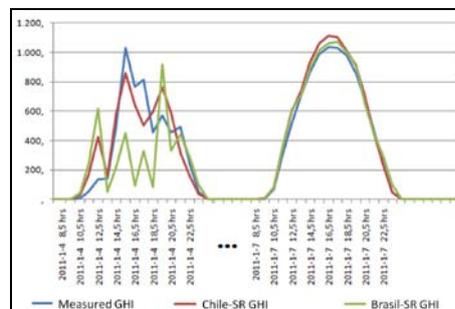


Figura 7 Comparación estimaciones y mediciones para Santiago, en un día nublado (izquierda) y un día claro (derecha).

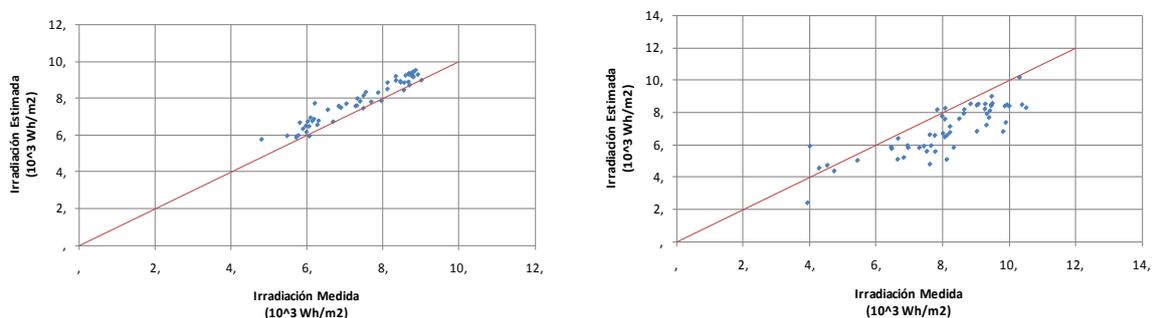


Figura 8 Comparación de estimaciones utilizando información satelital y mediciones terrestres para Santiago de Chile GHI (izquierda) y DNI (derecha) en W/m^2

En un análisis preliminar es posible observar que existen dos tendencias claras para las estimaciones satelitales, como se ilustra en la Fig. 8. Primero, es posible observar que la GHI estimada es ligeramente superior a la medida, mientras que la DNI estimada es menor a la medida. En segundo lugar, la DNI estimada posee una dispersión mucho mayor que la GHI. Con la cantidad de datos disponibles por el momento es bastante difícil obtener conclusiones significativas, más que señalar que el modelo Chile-SR aparentemente captura de mejor forma el comportamiento real de la radiación con un nivel aceptable de error. Sin embargo, es necesario enfatizar que cualquier conclusión es

prematura, ya que el modelo no se encuentra completamente validado, proceso que actualmente está llevándose a cabo en conjunto por investigadores de la PUC e INPE.

5. CONCLUSIONES

El esfuerzo de promoción de las energías renovables en Chile apunta a alcanzar la cuota de producción de energía de un 10% al año 2024. Este objetivo ha motivado el interés en la energía solar sobre otras fuentes de energía renovable, con anuncios de proyectos de tecnología fotovoltaica, de concentración solar, y de producción de calor industrial. Los autores han reportado previamente que se han identificado algunas bases de datos de radiación solar, que presentan desviaciones significativas entre ellas, que en su mayoría se componen de mediciones que poseen niveles desconocidos de incertidumbre. Esto resalta la necesidad de una iniciativa a largo plazo de evaluación del recurso solar que cubra una gran extensión del territorio nacional. Este artículo actualiza la situación de Chile al considerar los esfuerzos realizados en los últimos dos años por dos proyectos de evaluación de recurso que se están llevando a cabo, uno por CNE-GiZ y otro por PUC-FONDEF.

El programa de CNE-GiZ ha extendido su red de estaciones de medición, a siete ubicaciones y cuya configuración ha sido discutida por no ser estándar, y por lo tanto generando datos que no aseguran su validez, lo que ha llevado al operador de estas a reprocesarlos para lograr cuantificar sus niveles de incertidumbre y calcular una estimación de DNI más precisa y representativa que la DTP calculada directamente de las mediciones realizadas. El proyecto PUC-FONDEF está desplegando estaciones de medición, cinco siguiendo el estándar BSRN y siete del tipo RSBR, que están produciendo datos de acuerdo a buenas prácticas y estándares internacionales. Ambas redes de evaluación de recurso solar son relativamente nuevas, de modo que la estación más antigua lleva alrededor de tres años de funcionamiento. Un modelo de estimación de la radiación utilizando información satelital ha sido desarrollado considerando las condiciones particulares de Chile, que actualmente ya está produciendo estimaciones y se encuentra en proceso de validación. Las estimaciones realizadas con el modelo Chile-SR indican preliminarmente un buen grado de concordancia con mediciones en terreno, aunque esta validación preliminar no ha sido completamente exhaustiva y aún requiere esfuerzos adicionales.

Como se puede ver, Chile aún carece de una base de datos de radiación solar que pueda ser considerada como válida para el diseño de proyectos y conseguir financiamiento, aunque los esfuerzos que se están llevando a cabo están comenzando a dar resultados de interés y produciendo datos de alta calidad que se espera publicar en el corto plazo, por lo que esta falta de información solar sólida para Chile podría ser resuelta en breve.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean reconocer y agradecer el apoyo financiero de FONDEF que subvenciona el proyecto D08i1097, al Profesor André Olivares de la UTFSM por contribuir con los datos del ANS, a Karín Franzen y Trudy Konnemund de GiZ por proveer datos de sus estaciones y estar dispuestos a discutir sobre ellos, a Eduard Kern de Irradiance Inc. que amablemente nos ha ayudado a dominar las sutilezas del trabajo con las unidades RSBR.

REFERENCIAS

- Cáceres, R. 1984. Modelo Estadístico de la Radiación total en plano horizontal para diversas estaciones del país. Memoria de Título; Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica, UTFSM, Chile.
- Ortega, A., Escobar, R., Colle, S., Abreu, S. 2010. *The State of Solar Energy Resource Assessment in Chile*. Renewable Energy, 35, 11, 2514-2524.
- Pereira, E.; Martins, F.; de Abreu, S.; Ruther, R. 2006. Atlas Brasileiro de Energía Solar.
- Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A. 1997. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. Solar Energy; 60 (2): 89-96.
- R. Pitz-Paal, Norbert Geuder, Carsten Hoyer-Klick, Christoph Schillings, NREL 2007. How to get bankable meteo data? DLR solar resource assessment. Parabolic Trough Technology Workshop, March 8-9, 2007, Golden, Colorado. Pacific Northwest Solar Radiation Data book, 1999. University of Oregon Solar Monitoring Laboratory.
- Yilmaz, E. ; Cancino, B.; Parra, W. R., 2007. Statistical Analysis of Solar Radiation Data.
- Zelenka, Pérez, Seals and Renne, 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiance. Theoretical and Applied Climatology 62: 199-207.

ADVANCES IN SOLAR ENERGY RESOURCE ASSESSMENT FOR CHILE

Abstract. *This paper updates previous reports by presenting the advances made during the last two years regarding solar energy resource assessment in Chile. A new network of ground stations aiming to achieve BSRN standard of operation is being deployed in the country by the authors that provides developers, researchers and policymakers with good quality data. A second network composed of rotating shadowband radiometer devices (RSBR) is also being deployed by the authors in isolated locations of scientific interest. This report presents results and comparisons for all four data sources and a partial validation of the Chile-SR model is also presented. The authors describe each database of ground station measurements that are available to the public. The satellite-based Chile-SR model is then described, comparing the estimated data produced with different sources, when possible. In conclusion, this work shows the existence of public data sources of solar radiation, however currently none of those sources is completely valid.*

Key words: Solar Energy, Solarimetric Stations, Chile-SR