

ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL NORTE DE CHILE. COMPARACIÓN ENTRE DATOS MEDIDOS Y ESTIMADOS POR MODELOS DE DÍA CLARO ARG-P Y BASE DE DATOS SWERA.

M. S. Checura Díaz*, G. A. Salazar^{1,2}, R. Laspiur², T. G. Correa², J. Gutierrez².

¹INENCO

²Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – U.N.Sa.

Avda. Bolivia 5150 – CP A4408FVY – Salta Capital – Salta - Argentina

Tel./Fax +54-387-4255489

e-mail: toeroupas@msn.com, salazarg@unsa.edu.ar

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 01/10/12

RESUMEN: Los valores de radiación solar media diaria anual disponibles en la región que abarca el norte de Chile, el sudoeste de Bolivia y el noroeste de Argentina, serían superiores a 8.5 KWh/m² día, siendo de los pocos sitios del planeta con estos altos valores de energía solar. Sin embargo, ese valor es una estimación calculada a partir de modelos que utilizan imágenes satelitales y pocos datos medidos en superficie. Para determinar el grado de veracidad de esta estimación, en este trabajo se compararon los valores medios mensuales de radiación solar global medidos en 8 estaciones ubicadas en Chile, contra valores de la base de datos satelital SWERA y estimados con el modelo de día claro ARG-P. Se calcularon las irradiancias de día promedio (IDP) de cada mes para cada estación; se calculó la irradiación de esos días promedios y se realizó un análisis de las diferencias entre los valores medidos y los estimados por SWERA y ARG-P, a los efectos de determinar la validez del uso de la base de datos SWERA como fuente confiable con error conocido.

Palabras clave: irradiación solar global, SWERA, Chile, ARG-P.

INTRODUCCIÓN

Para determinar el potencial del recurso solar en un sitio, deben tenerse datos medidos en ese lugar por un periodo de tiempo que abarque varios años. Dado que resulta imposible instalar y mantener estaciones de medición en todos los sitios de interés y que, de ser posible la instalación de las estaciones, muchas veces las series temporales que se consiguen no están completas, es que se estudian métodos alternativos para obtener dichos datos, con un grado de certeza (o de incerteza) conocido.

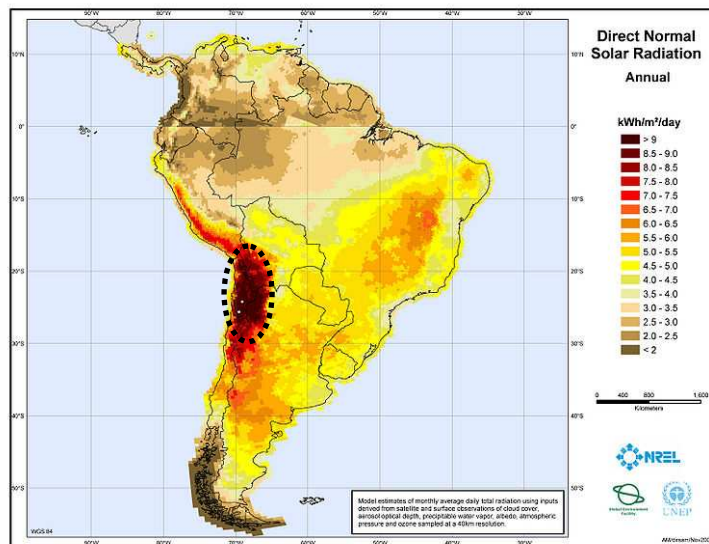


Figura 1. Estimación media anual de la radiación directa normal, según la base de datos satelitales de SWERA(swera.unep.net). Obsérvese lo alto de los valores en la zona marcada con una elipse punteada. Esta zona contiene las I, II y III Regiones de Chile, además de la parte oeste del NOA y el suroeste de Bolivia.

El uso de datos provenientes de bases de datos satelitales resulta muy útil, ya que estas abarcan grandes regiones (incluso, continentes enteros) a través de la concatenación de imágenes satelitales (celdas satelitales) que cubren un área de cierto tamaño, que se utilizan junto a datos medidos en superficie para realizar las estimaciones del valor de la radiación solar en superficie. Por ejemplo, la base de datos SWERA utiliza imágenes satelitales de 1600 km² de área (celdas cuadradas de 40 km de lado) a las que se aplica el modelo CSR (Maxwell *et al*, 1998) para las estimaciones de datos medios mensuales de

* Tesista de la Maestría en Energías Renovables de la U.N.Sa.

irradiación solar global, irradiación solar directa, irradiación solar difusa e irradiación solar “tilt” (la que se mide en un plano con la inclinación de la latitud del lugar). En la Figura 1 se puede apreciar los estimados medios anuales de la base de datos SWERA para Sudamérica. En este gráfico se observa una región con valores superiores a 8.5KWh/m²día. Esta región abarca el norte de Chile, el sudoeste de Bolivia y el Noroeste de Argentina. Estas regiones poseen climas desérticos de altura (bajas temperaturas y humedad relativa), salvo pocas zonas con microclimas. La disponibilidad de una fuente energética renovable tan abundante, como lo sería la solar, induce a pensar en las posibles maneras de aprovecharla para implementar emprendimientos industriales o energéticos. Pero antes es necesario realizar estudios más detallados de los valores disponibles de radiación solar a los efectos de validar la base de datos SWERA.

La base de datos SWERA, al tener celdas satelitales relativamente pequeñas, presenta valores estimados más próximos a los reales, en base media mensual. Sin embargo existen indicios que si el terreno dentro de la celda satelital es montañoso, aparecerán discrepancias entre los valores medidos y los estimados (Grossi Gallegos, 1999). Para identificar el posible origen de estas discrepancias, se compararon los datos medidos contra estimaciones hechas con un modelo de día claro: el modelo ARG-P (Salazar *et al*, 2010). Este modelo es empírico y está diseñado para realizar estimaciones de irradiancia e irradiación en sitios a más de 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar, con un error promedio del 10 %.

El estudio de los valores estimados por SWERA para la República de Chile, con su longilínea forma y accidentada geografía, la comparación de esos datos con valores medidos y con estimaciones de día claro, permitirá conocer el grado de confiabilidad de los valores estimados por SWERA para regiones de las que no se dispongan de datos medidos, además de poder estudiar los posibles efectos de la orografía sobre los valores estimados por los dos modelos analizados. Además, permitirá ayudar a detectar los sitios con alta posibilidad para instalar emprendimientos energéticos (fotovoltaicos o de concentración).

LOS DATOS

Se trabajó con datos provenientes de 8 estaciones de medición, distribuidas de la I a la IV Regiones de la República de Chile (Fig. 2). En la Tabla 1 se muestran la latitud, longitud y altura a la que esta cada estación.



Figura 2. Posición de las 8 estaciones cuyos datos se analizaron en este trabajo (imagen de Google Earth ®).

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m.)	Región de Chile
Pampa Camarones	- 18.858 °	- 70.217 °	798	I
Pozo Almonte	- 20.257 °	- 69.775 °	1024	I
Crucero	- 22.274 °	- 69.566 °	1176	II
San Pedro de Atacama	- 22.976 °	- 68.160 °	2390	II
Salvador	- 26.312 °	- 69.750 °	1617	III
Inca de Oro	- 26.753 °	- 69.906 °	1541	III
Fray Jorge	- 30.650 °	- 71.685 °	547	IV
Huintil	- 31.573 °	- 70.998 °	590	IV

Tabla 1. Nombre de cada estación, así como su posición geográfica, altura sobre el nivel del mar y región a la que pertenece. El signo menos para la latitud indica que es latitud Sur (al sur del ecuador), mientras que el signo menos para la longitud indica que es Oeste (al oeste del meridiano de Greenwich).

En la Figura 3 se observan los valores medios mensuales de irradiación solar global para cada uno de los sitios según la base de datos SWERA, el modelo de cielo claro ARG-P y los valores medidos en las 8 estaciones.

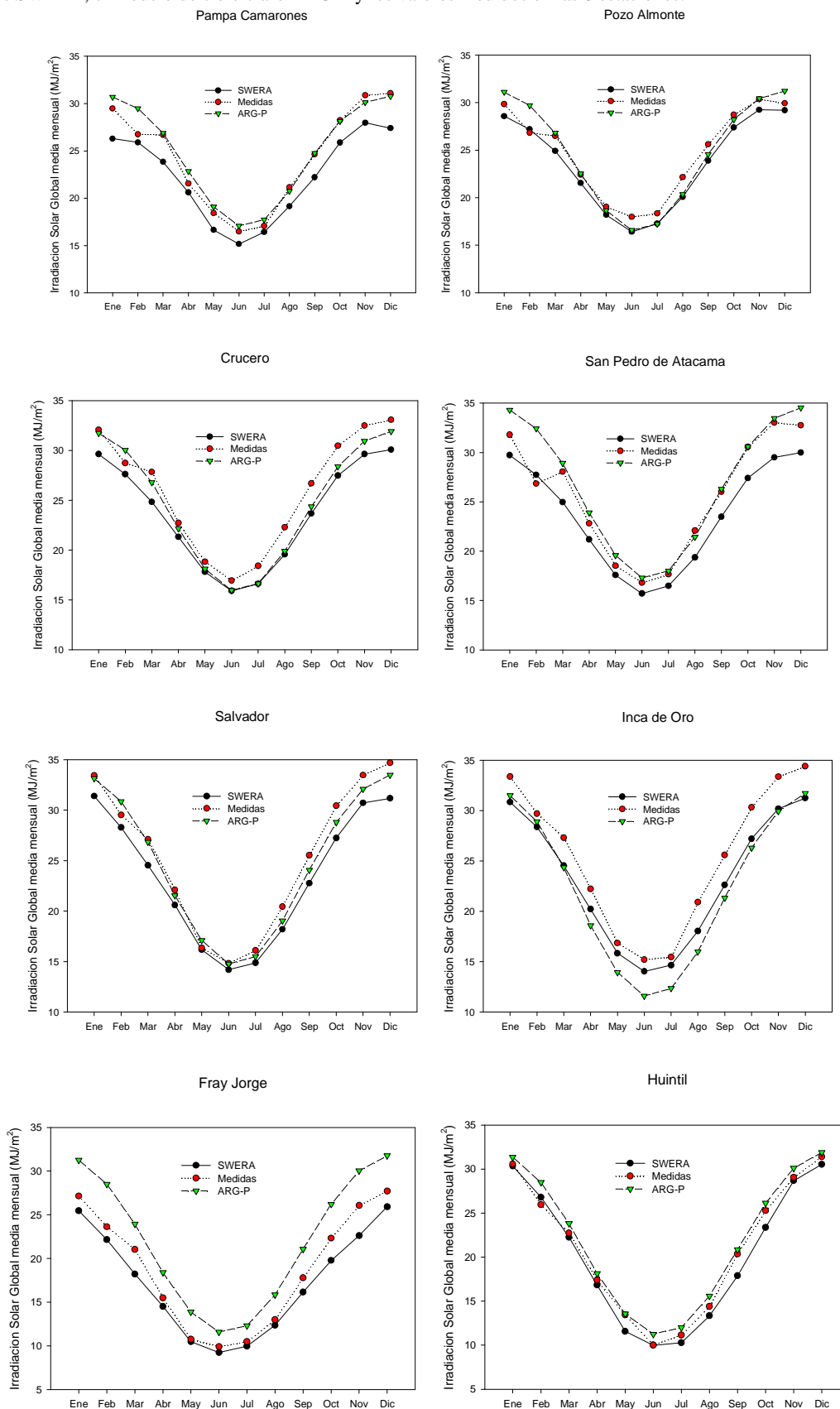


Figura 3. Comparación de los valores medios mensuales de la radiación solar global medida en cada estación, con los valores estimados por SWERA y el modelo ARG-P.

En la Tabla 2 se han calculado los Errores Cuadráticos Medios (RMSE, siglas en inglés) entre los datos medidos y los estimados por SWERA y por ARG-P y también el promedio de las diferencias (MBE, siglas en inglés). Se han realizado

además pruebas t (de Student) y pruebas F (de Snedecor) a los datos para establecer la probabilidad que las series de datos posean iguales medias o iguales varianzas.

ESTACIÓN	RMSE-S (MJ/m ²)	RMSE% (S)	RMSE-A (MJ/m ²)	RMSE% (A)	MBE-S (MJ/m ²)	MBE-A (MJ/m ²)	Prueba t (S)	Prueba F (S)	Prueba t (A)	Prueba F (A)
Pampa Camarones	2.28	9.37	1.03	4.15	2.08	-0.49	0.32	0.65	0.82	0.96
Pozo Almonte	1.29	5.22	1.27	5.14	1.15	0.03	0.56	0.93	0.99	0.57
Crucero	2.35	9.08	1.5	6.07	2.20	1.13	0.35	0.76	0.65	0.92
San Pedro de Atacama	2.32	9.07	1.93	7.22	1.98	-1.15	0.4	0.75	0.66	0.76
Salvador	2.23	8.79	1.06	4.27	1.99	0.57	0.49	0.72	0.85	0.93
Inca de Oro	2.42	9.51	3.35	15.09	2.25	3.18	0.43	0.76	0.3	0.84
Fray Jorge	1.82	9.67	3.42	15.49	1.54	-3.29	0.56	0.71	0.27	0.71
Huintil	1.2	5.73	1.11	5.06	0.82	-0.96	0.8	0.93	0.76	0.97

Tabla 2. Análisis estadístico de los datos medidos. El RMSE y el RMSE% se calcularon entre los datos medidos y los de SWERA (marcados con una S) y entre los datos medidos y los de ARG-P (marcados con una A). El promedio de las diferencias (MBE) se ha realizada restando los valores medidos a los valores estimados. Las pruebas t y F (de Student y de Snedecor, respectivamente) indican la probabilidad que las dos muestras provengan de poblaciones con la misma media (prueba t) y que provengan de poblaciones con la misma varianza (prueba F).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos de la Figura 3 y de la Tabla 2 se pueden comenzar a realizar análisis preliminares.

- i) Pampa Camarones (798 m.s.n.m.): Los valores medios mensuales medidos están más cercanos a los estimados por el modelo ARG-P que a SWERA, según los valores de los RMSE y RMSE%. Esta situación se aprecia también en la Figura 3. Es decir, *los valores de irradiación solar global medidos se correlacionan mejor con los valores de días claros, lo que indicaría una abundancia de días con estas características* (salvo en enero y febrero). Las diferencias con respecto a SWERA posiblemente se deban a irregularidades del terreno en la celda completa (esta celda abarca parte del océano Pacífico).
- ii) Pozo Almonte (1024 m.s.n.m.): los valores medidos se corresponden bastante bien con los valores de SWERA y ARG-P. De hecho, salvo en los primeros y en los últimos meses, la correlación entre los valores de SWERA y ARG-P coinciden casi perfectamente, siendo los valores medidos los que se encuentran por encima de esos estimados. El análisis estadístico muestra algo interesante: *los datos medidos comparten la varianza de los datos de SWERA y la media de ARG-P*.
- iii) Crucero (1176 m.s.n.m.): se observa una mejor correlación respecto del modelo de día claro ARG-P, inclusive para el análisis estadístico.
- iv) San Pedro de Atacama (2390 m.s.n.m.): como se esperaba, *el modelo de día claro ofrece mejores resultados al compararlo con los datos medidos*; sin embargo, la diferencia para ese modelo es muy apreciable (7.22 %) y el estudio estadístico indica una mayor similitud entre los datos medidos con los del modelo ARG-P. *Esto indica la existencia de una mayor cantidad de días claros con atmósfera limpia*.
- v) Salvador (1617 m.s.n.m.): todo indica *una mejor correlación de los datos medidos con el modelo de día claro*, tanto en los valores generales como en los estadísticos.
- vi) Inca de Oro (1541 m.s.n.m.): esta estación *presenta fuertes discrepancias de los datos medidos con las del modelo de día claro (≈ 15%)*. Se observa que los datos medidos exceden tanto a los de SWERA como a los de ARG-P.
- vii) Fray Jorge (547 m.s.n.m.): esta estación también *presenta fuertes discrepancias de los datos medidos con las del modelo de día claro (≈ 15%)*. Esta discrepancia puede deberse a su microclima: Fray Jorge es un Parque Nacional con frondosos bosques, lo que indica una tasa de precipitación que a su vez implica nubosidad abundante.
- viii) Huintil (590 m.s.n.m.): *presenta una muy buena correlación entre las tres series de datos analizados (SWERA, ARG-P y Medidos)*

Pampa Camarones, Pozo Almonte, Salvador y Huintil son las estaciones que muestran una marcada correlación (véase los resultados de la Prueba t y la Prueba F en la Tabla 2, así como los valores de MBE, RMSE y RMSE%) entre los datos medidos y los estimados con el modelo de día claro ARG-P. Huintil es la única estación que muestra una marcada correlación estadística entre los valores medidos y los estimados por SWERA.

Desde el punto de vista de la base de datos SWERA, las estaciones que mejor correlacionan son Pozo Almonte y Huintil mientras que los peores son Inca de Oro y Fray Jorge. Debe notarse que ninguna presenta un error superior al 10 %. Desde el punto de vista del modelo de día claro ARG-P, los dos mejores son Pampa Camarones y Salvador, mientras que los peores son Inca de Oro y Fray Jorge. Algo a destacar es que los datos medidos en Inca de Oro resultan ser superiores a los de SWERA y ARG-P mientras que los de Fray Jorge son muy inferiores.

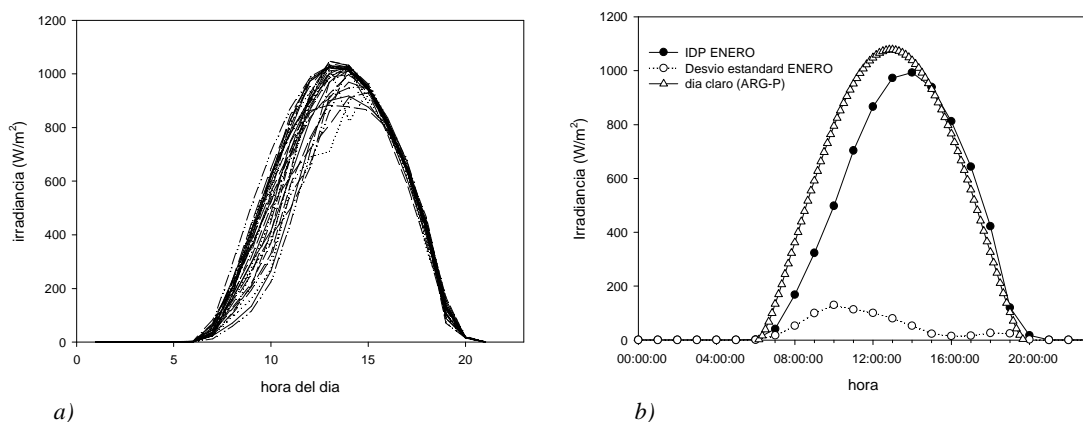


Figura 4a. Irradiancias diarias correspondientes a los 31 días del mes de Enero, en la estación Fray Jorge. La irradiancia del día 1 de enero es el promedio de los 5 días días 1 de enero, de los 5 años con datos medidos en esta estación. El mismo procedimiento se aplico a los siguientes días de enero. Figura 4b. Se han superpuesto las graficas correspondientes a la IDP de Enero (irradiancias de día promedio) de la estación Fray Jorge, así como la desviación estándar de los datos de los 31 días, para cada hora del día. Esta información es valiosa ya que muestra las horas del día en las que la irradiancia varió. La gráfica de la irradiancia esperada para un día claro (ARG-P). De la gráfica de la desviación estándar y de la de día claro, resulta evidente que por las mañanas es dominante una merma de la irradiancia solar, mientras que en horas de la tarde, el cielo no presentaría nubes.

El análisis de las gráficas de Irradiancia de día promedio (IDP) es una herramienta muy útil al momento de establecer el origen de las causas de las desviaciones de los datos medidos respecto de los estimados (Salazar y Checurea, 2011). Por ejemplo, veamos las IDP de la estación Fray Jorge para el mes de enero. En la Figura 4a se observan las irradiancias de los 31 días de enero. En la Figura 4b se muestran la gráfica IDP para enero, la desviación estándar de los datos de la IDP y la irradiancia esperada para un día claro promedio. La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética. Esto nos da una idea de si la irradiancia varió mucho, o poco, a una cierta hora del día. En la gráfica puede observarse que los valores más altos del desvío estándar ocurrieron a las 10 de la mañana ($\sigma > 100 \text{ W/m}^2$, respecto del promedio para esa hora), lo que nos indica que a esa hora es cuando ocurrieron las mayores variaciones en el valor de la irradiancia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado valores de irradiancia medidos en 8 estaciones distribuidas desde la I a la IV Regiones de la República de Chile. Se han calculado los IDP para la estimación del valor medio mensual de irradiación solar global y se las ha comparado contra los datos medios mensuales de la base de datos satelital SWERA y contra estimaciones de día claro realizadas con el modelo ARG-P.

Se ha determinado que los datos medios mensuales de irradiación solar global medidos en las 8 estaciones tienen un error menor a los 10% comparados con los datos de la base de datos SWERA. Dado que este es el error nominal que estimaron sus diseñadores, resulta bastante claro que los valores de la base de datos SWERA podrán usarse con bastante confiabilidad para estimar irradiación solar para todo el norte de Chile. Además brinda certeza al alto valor de $8.5 \text{ KWh/m}^2/\text{día}$ de irradiación solar estimada para la región.

El método de las IDP muestra se muestra nuevamente como una herramienta útil a la hora de analizar datos de irradiancia solar, ya que permite caracterizar el comportamiento de la irradiancia solar así como su dispersión, identificando momentos del día con máximos o mínimos de radiación. Esta información será útil al momento de evaluar la implementación de sistemas solares para la producción de electricidad en cantidades industriales

REFERENCIAS

Maxwell E. L., R. L. George, S. M. Wilcox (1998). A climatological solar radiation model. Boulder: American Solar Energy Society Inc, 1998.

<http://swera.unep.net> (última entrada junio de 2012)

Salazar G. A., L. A. Hernández, L. R. Saravia (2010) "Practical models to estimate horizontal irradiances in clear sky conditions. Preliminary results". Renewable Energy 35 pp. 2452-2460.

Grossi Gallegos H. (1999) Comparación de los valores satelitales del "Surface Solar Energy (SSE) Data Set Version 1.0" con datos de tierra de la Red Solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, pp. 1-6.

Salazar G., M. Checura Díaz (2011) Estudio de la variación de la irradiancia solar global mediante análisis gráfico y estadístico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 1127-1132.

ABSTRACT

The values of annual average daily solar radiation available in the region spanning northern Chile, southwestern Bolivia and northwestern Argentina, would be above 8.5 KWh/m²day, being one of the few places on Earth with these high values of solar energy. However, this value is an estimate calculated from a model that use satellite images and very few data measured on surface. To determine the degree of accuracy of this estimate figure, in this study compared the mean monthly global solar radiation measured at 8 stations in Chile, against values of the database SWERA and estimates with the clear sky model ARG P. It was calculated the average daytime irradiances (IDP) of each month for each station; also the average irradiances of those days and analyzed the differences between measured values and those estimated by SWERA and ARG-P, for the purposes determine the validity of using the database as a reliable source SWERA with known error.

Keywords: global solar irradiation, SWERA, Chile, ARG-P.