

EMPLEO DEL MODELO DE TARPLEY PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES GOES EN ARGENTINA.

R. Righini,¹ D.Barrera ².

¹GERSOLar, Universidad Nacional de Luján

²Dto. De Meteorología, FCEyN (UBA).

Rutas 5 y 7, Luján. CP; 6700

Tel. 02323-440241 e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se estudia el empleo de imágenes satelitales obtenidas en el rango visible del espectro electromagnético para estimar la radiación solar global (RSG) a nivel de superficie. Se emplea el algoritmo de Tarpley para realizar la estimación. Se obtienen las constantes de ajuste del modelo empleando datos de estaciones en tierra en cinco lugares de Argentina. Realizando un ajuste selectivo en función del índice de claridad (kt) e obtienen errores cuadráticos medios del orden del 17% para valores diarios y del 9% para valores medios mensuales. Se muestran posibles aplicaciones de la información así obtenida.

Palabras clave: energía solar, modelo de Tarpley, GOES 8, imágenes satelitales.

INTRODUCCION

El aprovechamiento energético de la radiación solar como fuente de energía para diversos procesos, su empleo en la evaluación de los balances energéticos en procesos físicos biológicos, y la cuantificación del cambio climático que nuestro planeta estaría experimentando (Barros, 2004), son tópicos que necesitan información sobre los niveles de radiación solar que llegan a la superficie terrestre.

Para ello es necesario contar con una red que contenga la suficiente cantidad de estaciones que permitan cubrir un territorio tan extenso y climáticamente diverso como el de la República Argentina, y que lo hagan con la extensión y continuidad temporal que la variabilidad propia del recurso requiere.

Argentina llegó a tener una red solarimétrica que contaba con 41 estaciones funcionando; hoy solamente quedan cuatro. El mantenimiento de estas redes es difícil de sostener en el tiempo y la gran superficie del país hace necesarias estimaciones del recurso en áreas muy alejadas de las estaciones. Esta conjunción de circunstancias determina que existan grandes dificultades en evaluar la distribución espacial del recurso solar en áreas importantes con la precisión que se requiere para su aplicación tecnológica.

La combinación de estaciones de medición terrestre y evaluación del recurso solar a través de imágenes satelitales es un camino alternativo que merece explorarse como alternativa para superar las dificultades descriptas.

El advenimiento de los satélites de observación terrestre contribuyó a incrementar el conocimiento, a escala global, de muchos procesos relacionados con el intercambio energético radiativo en la superficie terrestre y la atmósfera. En particular los satélites meteorológicos geoestacionarios presentan una resolución espacial de uno a cuatro kilómetros y brindan imágenes con una frecuencia de muestreo que llega, en algunos casos, a una cada 30 minutos. Son, por lo tanto, particularmente adecuados para evaluar el recurso solar en áreas tan extensas como presenta la Argentina.

El modelo de Justus, Paris y Tarpley (1984) ha sido empleado con éxito con ese objetivo en diversas zonas de Sudamérica. Sin embargo las constantes de ajuste utilizadas fueron las correspondientes al hemisferio norte. En el presente trabajo se emplean datos de estaciones de Argentina e imágenes correspondientes al rango visible del espectro electromagnético del satélite GOES 8 (ahora reemplazado por el GOES 12), cuyo nadir se encuentra en el ecuador en 75ª de longitud oeste.

ANTECEDENTES

Tarpley comenzó en 1977 a emplear imágenes proveniente del Satélite GOES con el objetivo de evaluar la energía solar incidente en las Grandes Planicies de los Estados Unidos (Tarpley, 1979). Los resultados fueron alentadores y revelaron que un satélite geoestacionario como el GOES podría ser usado para estimar la radiación solar con errores del 10% al 15%.

Como parte del programa de Inventario de Agricultura y Fuentes, dependiente del Aerospace Remote Sensing (AgRISTARS), Justus et al.(1986) desarrollaron el modelo JTP para producir mapas de insolación en los Estados Unidos, México y Sud América, usando imágenes del canal visible del satélite GOES. El período cubierto se extendió entre los años 1982 y 1983.

En el año 1990, Frulla et al. (1990), emplearon el algoritmo de Tarpley para estimar la radiación en el sur de Brasil. Usando los cálculos realizados por Tarpley para Sudamérica con coeficientes de ajuste calculados empleando estaciones de medición e imágenes de las Grandes Planicies Norteamericanas, concluyeron que era posible emplear el modelo para estimar la radiación diaria con un error que se encontraba entre el 15% y el 30%. Los errores fueron calculados comparando datos estimados por el modelo con mediciones realizadas en estaciones terrestres. En ese trabajo se concluía que el modelo podía adecuarse a Argentina, debiendo previamente calcularse los coeficientes de ajuste para nuestro país, estudiando los cambios debidos a factores estacionales en el albedo de superficie, cambios en el sensor o reemplazo del satélite por otro.

Righini (2004) publicó una primera evaluación del desempeño del modelo de Tarpley para estimar la RSG a nivel de superficie, empleando imágenes del satélite GOES 8. Solamente se usaron en esa ocasión datos de dos meses en cinco estaciones de Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo JTP emplea solamente una ecuación de regresión válida para todas las condiciones de nubosidad y no necesita datos meteorológicos suplementarios, tales como agua precipitable. Esta circunstancia lo hace particularmente apreciable para ser utilizado en zonas donde esa información no se encuentra disponible, zonas que generalmente se encuentran aisladas y donde el empleo de energías alternativas tiene alta justificación económica y social.

El algoritmo utiliza la siguiente ecuación:

$$HG = F_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta \left[a + b \cos \theta + c \cos^2 \theta \right] + d (B_m^2 - B_0^2) \quad (1)$$

Aquí

F_0 es el valor total horario para la constante solar;

B_m es el blanco medio observado; y

B_0 es el brillo despejado, definido anteriormente.

$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2$ es el factor de corrección por la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del sol.

El último término del miembro derecho de la ecuación es proporcional a la diferencia entre el cuadrado de la radiancia observada y el cuadrado de la radiancia del cielo despejado, y se constituye en el término de corrección de nubosidad. Se realizó esa elección pues en la calibración del satélite GOES las radiancias son proporcionales al cuadrado de las cuentas de brillo.

Dado que existen variaciones direccionales en la reflectancia del sistema tierra-atmósfera causadas por la posición de la tierra, el ángulo de visión, la iluminación solar, es imprescindible determinar valores de brillo despejado para cada visión temporal del satélite y para cada una de las áreas, usando la denominada "técnica de brillo mínimo". La misma se basa en considerar que, para un momento particular del día y para cada área blanco, se conocen el brillo bajo condiciones de cielo despejado B'_0 y el correspondiente brillo promedio del blanco observado B_m . Se establecen dos valores umbrales $B_{m\min}$ y $B_{m\max}$, los que indican la probable presencia de nubes en el momento de la observación ($B_m > B_{m\max}$) o una escena insuficientemente iluminada para estimaciones de insolación ($B_m < B_{m\min}$).

Se determina un nuevo valor de brillo despejado por las relaciones

$$B_0 = B'_0 \quad \text{si } B_m \geq B_{m\max} \quad (2)$$

$$B_0 = w_1 \cdot B'_0 + (1 - w_1) \cdot B_m \quad \text{si } B'_0 < B_m < B_{m\max} \quad (3)$$

$$B_0 = B_m \quad \text{si } B'_0 - \text{Resol} < B_m \leq B'_0 \quad (4)$$

$$B_0 = w_2 \cdot B'_0 + (1 - w_2) \cdot B_m \quad \text{si } B_{m\min} < B_m < B'_0 - \text{Resol} \quad (5)$$

$$B_0 = B'_0 \quad \text{si } B_m < B_{m\min} \quad (6)$$

en donde los pesos w_1 y w_2 pueden ser valuados entre 0 y 1, y $B_{m\min}$ y $B_{m\max}$ han sido definidos por los valores predeterminados de umbral. Los valores de w_1 y w_2 , empíricamente determinados por Justus (Justus et al., 1984), son 0,99 y 0,90 respectivamente. Resol es un valor entero relacionado con la resolución espectral en el rango visible del detector embarcado en el satélite.

Ajustando las estimaciones con los datos medidos por estaciones piranométricas en tierra, se calculan los valores de las constantes a, b, c y d que aparecen en la ecuación (1).

Para el presente trabajo se emplearon imágenes del Satélite GOES 8, obtenidas sobre Argentina durante los meses de Mayo de 2000, Enero de 2001, Marzo de 2002, Abril de 2002, Agosto de 2002, Septiembre de 2002, Octubre de 2002, Noviembre de 2002 y Diciembre de 2002.

Estación	Piranómetro Tipo	Latitud	Longitud
Cerro Azul	Eppley 8-48	27°39'S	55°26'O
Paraná	Rho Sigma	31°50'S	60°31'O
Córdoba	Eppley 8-48	31°26'S	64°11'O
San Miguel	Eppley PSP	34°33'S	58°44'O
Luján	Cimel CE 180	35°35'S	59°04'O

Tabla 1: Estaciones y sensores instalados en las mismas

Se procesaron las imágenes GOES extrayendo de las matrices originales subconjuntos (submatrices) de que contenían los datos de 5 x 5 píxeles alrededor de cada una de las estaciones de medición seleccionadas para el ajuste del modelo. El objetivo fue tomar una muestra alrededor de cada estación para poder promediar los datos obtenidos por el satélite y los derivados de la aplicación del Modelo de Tarpley, disminuyéndose así efectos espurios provocados por fallos en la adquisición de imágenes.

Una vez definida la zona de interés, registrada la imagen, seleccionada la cantidad de píxeles a considerar alrededor de la estación, extraídas la submatrices correspondientes a cada uno de los horarios en que se poseía imágenes para cada uno de los meses analizados, se procedió al cálculo del brillo del blanco observado B_0 , tal como lo requiere la aplicación del método de Tarpley.

El algoritmo de Tarpley es fuertemente dependiente del B_0 . Ese valor representa la reflectancia del suelo en condiciones de cielo despejado, y por ello, su comparación con el valor de reflectancia medida por el satélite en un determinado horario permite inferir el grado de cobertura de nubes del área analizada. Este hecho determina la necesidad de extremar los cuidados en su cálculo para evitar errores.

En la primera etapa del presente trabajo se evaluó B_0 para cada uno de los píxeles y horarios relacionados con las 5 submatrices en cuyo elemento central contenía información sobre la estación de medición de referencia.

Se calculó, entonces, el B_0 de cada uno de los píxeles correspondientes a las matrices de 5x5 elementos centradas en las estaciones. Se lo hizo para cada uno de las horas en que existen imágenes disponibles.

Un primer punto a tener en cuenta es el B_0 de partida, es decir el valor que inicialmente se atribuye al suelo. Si bien es cierto que luego de un largo período de tiempo el proceso indicado en las ecuaciones (2-6) debe converger a un valor, independiente de la elección inicial, es de tener en cuenta que ese período no debe ser muy extenso, ya que se busca que el modelo tome en cuenta variaciones estacionales que pueden modificar el albedo del suelo, lo que podría frustrarse si el valor inicial no es adecuadamente seleccionado.

El análisis de esta situación reveló como inconveniente la opción tomada de partir del primer valor de reflectancia del período en el horario considerado como valor inicial para cada uno de los píxeles. Se optó, por lo tanto, en partir del valor mínimo absoluto que alcanza la reflectancia en todo el año analizado, para cada horario y para cada píxel de las submatrices. La elección del mínimo es anual pues pueden existir variaciones anuales del mismo, que serían ignoradas si se lo eligiera dentro de todos los datos disponibles en todos los meses de los distintos años analizados.

Dado que el proceso de cálculo explicado por las ecuaciones (2-6) también tiene en cuenta el valor máximo B_{max} de reflectancia, se hizo lo mismo en ese caso, determinando B_{max} como el máximo valor existente en toda la base de datos, siempre para cada horario y píxel sobre el cual se aplicó el modelo.

Por lo tanto, esos valores de referencia no dependían de la elección inicial, sino que representaban un período de observación lo suficientemente prolongado como para fijarlo. Si se tratase de un modelo operacional, estos valores iniciales debieran recalcularse periódicamente, admitiendo valores menores para B_0 inicial y B_{max} , de acuerdo a los datos brindados por el satélite en un período mayor que el inicialmente considerado.

Se calcularon los promedios de todos valores de reflectancia en los píxeles de las submatrices de 5 x 5 centradas en cada estación para cada uno de los horarios disponibles. De esos valores promedio se tomó el mínimo dentro de un año, siempre para cada horario, y ese se tomó como valor inicial de B_0 . Es decir que de las cinco submatrices se pasó a un vector de cinco elementos. Idéntico procedimiento se llevó a cabo para calcular el máximo.

Una vez establecidos los valores B_0 inicial y B_{max} , se toman como datos de entrada los valores medios anteriormente calculados para cada una de las submatrices en los distintos horarios. A estos valores se les aplica el algoritmo de Tarpley.

Empleando software desarrollado especialmente, se estimó la radiación solar global a nivel de superficie en los píxeles correspondientes a la ubicación de las estaciones de medición.

Se analizaron en total 715 días, considerando todos los días de datos disponibles en las 5 estaciones de referencia. Luego de varios ensayos, se optó por calcular las constantes de ajuste del modelo considerando valores diferenciados para las mismas en función del índice de claridad kt.

Considerando que el kt es el cociente entre la radiación medida a nivel de superficie y la existente a tope de atmósfera, es razonable discriminar el ajuste en función de ese parámetro. kt bajos indican días con alta nubosidad, mientras que kt altos indican condiciones de cielo despejado. En función del algoritmo empleado para el cálculo, es razonable presuponer que el mejor ajuste debe tenerse para condiciones de cielo despejado, y que el cálculo debe empeorar cuando el kt sea bajo.

Esto fue corroborado. Seguidamente se muestran los gráficos del ajuste entre valores calculados y medidos en las estaciones de referencia, ajustando las constantes del modelo discriminándolas según el kt , usando un único juego de constantes para todas las estaciones. Fueron consideradas tres condiciones distintas para la separación en función de la cobertura de cielo: $kt < 0,3$; $0,3 < kt < 0,6$ y $kt > 0,6$. Los datos de todas las estaciones y meses fueron procesados juntos.

RESULTADOS

Las relaciones entre valores medidos y estimados de RSG tanto diarios como promedios mensuales se muestran en los siguientes gráficos.

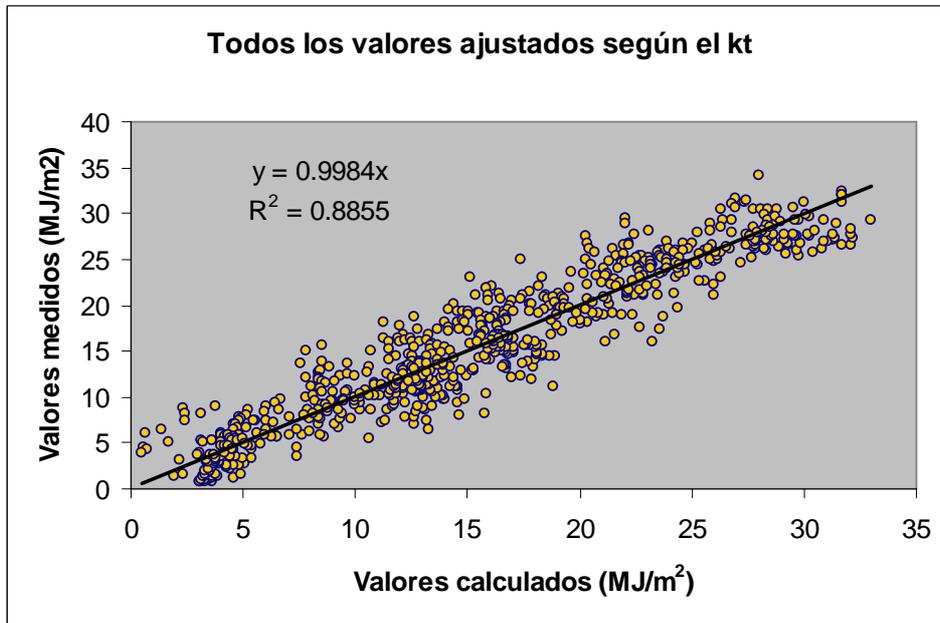


Figura 1: Integrales diarias para todos los meses y todas las estaciones. Valores medidos y estimados calculando las constantes según el kt .

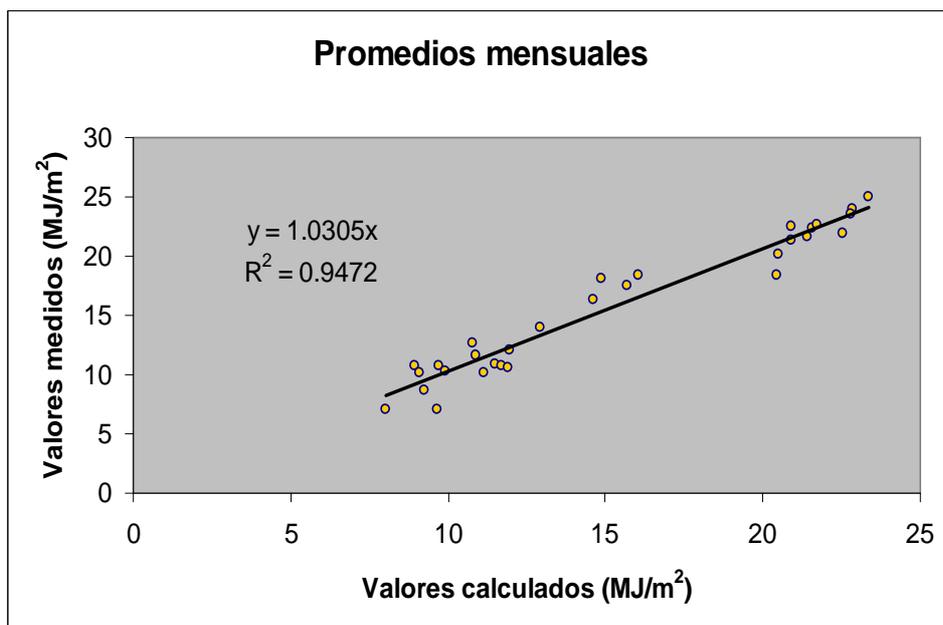


Figura 2: Integrales promedios mensuales para todos los meses y todas las estaciones. Promedios medidos y calculados seleccionando las constantes según el kt .

ERRORES

Una vez calculadas las constantes de ajuste según el kt, se calculan los errores cometidos para las estimaciones diarias y medias mensuales para todas las estaciones, los que se muestran en las tablas siguientes.

Mes	Cerro Azul	Córdoba	Paraná	San Miguel	Luján
Enero de 2001	14.0	-1.8	-2.9	-6.3	-5.0
Marzo de 2002			-14.3	2.1	-12.5
Abril de 2002			1.4	14.7	14.8
Mayo de 2000	8.6	19.8	19.1	75.8	
Agosto de 2002			3.5	26.0	19.2
Septiembre de 2002			7.3	0.1	13.1
Octubre de 2002			-8.7	-10.4	-12.8
Noviembre de 2002			-2.7	-4.0	-6.6
Diciembre de 20002			3.0	1.0	

Tabla 2: Errores medios relativos porcentuales, analizados mes a mes, para cada una de las estaciones en el período analizado.

Mes	Cerro Azul	Córdoba	Paraná	San Miguel	Luján
Enero de 2001	20.9	14.6	15.8	12.3	12.7
Marzo de 2002			21.6	26.2	33.2
Abril de 2002			35.2	29.1	35.2
Mayo de 2000	26.5	36.7	25.3	53.4	
Agosto de 2002			15.9	22.3	24.3
Septiembre de 2002			15.9	16.1	16.2
Octubre de 2002			27.4	17.3	29.8
Noviembre de 2002			14.7	15.1	15.6
Diciembre de 20002			20.0	17.5	

Tabla 3: Errores cuadráticos medios porcentuales, analizados mes a mes, para cada una de las estaciones en los períodos considerados.

Errores medios relativos porcentuales	-1.4
Errores cuadráticos medios porcentuales	8.9

Tabla 4: Errores para los promedios mensuales

Errores medios relativos porcentuales	7,1
Errores cuadráticos medios porcentuales	17,3

Tabla 5 Errores para datos diarios considerando todo el período analizado.

TRAZADO DE CARTAS DE RADIACIÓN

Una vez ajustado el modelo, puede utilizarse la información disponible para trazar cartas de radiación solar. A título de ejemplo se muestran el valor medio mensual correspondiente al mes de enero de 2001 para parte de la provincia de Buenos Aires

Para el trazado de las isolíneas se utilizó el método de kriging. Esta metodología ya fue empleada para trazar mapas de irradiación en diversas zonas de Argentina, Paraguay y Brasil y en particular en la Pampa Húmeda Argentina (Righini y Grossi Gallegos, 2000 a; Righini y Grossi Gallegos, 2000 b; Righini y Grossi Gallegos, 2001; Grossi Gallegos y Righini, 2002; Righini y Grossi Gallegos 2003; Righini et al., 2005). Los resultados que brinda el trazado de las isolíneas por kriging en su conjunción con la información que entregan los modelos satelitales permiten estimar el recurso solar con un método que minimiza la arbitrariedad que otros mecanismos presuponen.

Si bien el mapa mostrado tiene un valor relativo, ya que el modelo solamente fue validado en dos estaciones que cubren una zona muy específica del área total, muestra la factibilidad de la aplicación del modelo para estimar la irradiación solar global diaria a nivel de superficie en el plano horizontal en áreas extensas de nuestro país.

Los resultados presentan buen acuerdo con las mediciones realizadas en las estaciones de referencia (Luján y San Miguel) durante la mayoría de los días del mes de Enero.

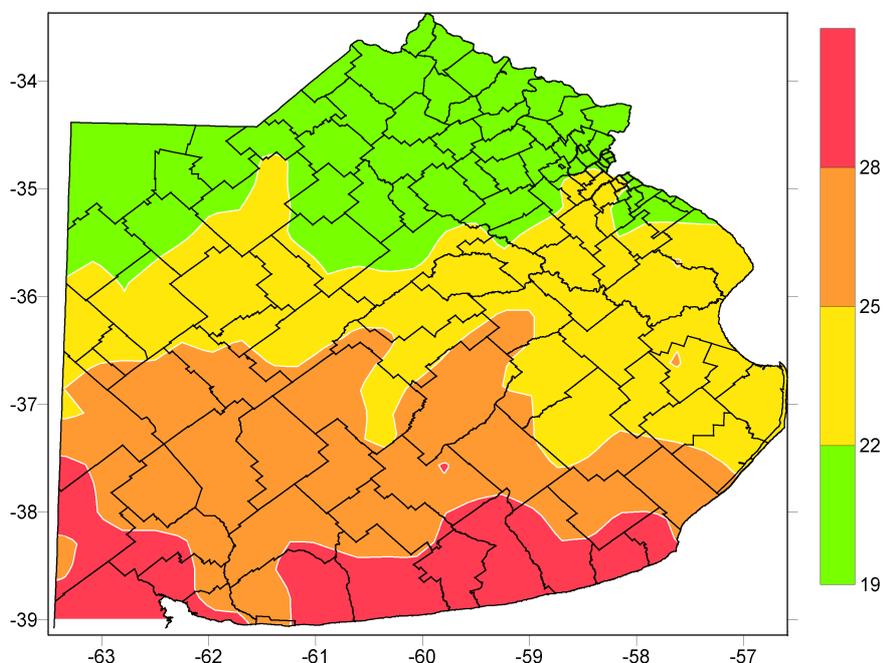


Figura 3: Carta de valores medios diarios de irradiación (Mj/m^2) calculados para el mes de Enero de 2001.

CONCLUSIONES

La existencia de satélites meteorológicos de observación terrestre supone una oportunidad única de cobertura de un territorio tan extenso como el argentino. Los satélites geoestacionarios como los de la serie GOES brindan información en varios rangos del espectro electromagnético, y lo hacen con una considerable cantidad de imágenes diarias, proporcionando acceso gratuito a las mismas. Una herramienta como ésta debería ser empleada para obtener datos de mayor calidad.

Un sistema conformado por algunas estaciones situadas en tierra en lugares clave, unidas a la información satelital, posibilitaría, aplicando un algoritmo de evaluación de la radiación solar en función de las imágenes, evaluar el recurso energético en gran parte de Argentina. Si bien es cierto que la evaluación en zonas montañosas, resulta particularmente compleja, no es menos cierto que existen zonas de llanura en grandes áreas de nuestro país donde los algoritmos son más confiables, y los errores menores. En particular la Pampa Húmeda se presenta como una zona orográficamente sencilla de tratar. En ella se realiza una porción fundamental de la producción agropecuaria argentina. Vive en esa zona la mayoría de la población del país, existiendo también núcleos poblacionales dispersos sin acceso pleno a la energía.

De los modelos estadísticos de estimación de la RSG, el de Justus-Tarpley es uno de los más sencillos, pero no por ello menos exitoso. Los trabajos previos de empleo de este algoritmo en Sudamérica (Argentina y Brasil) resultaron promisorios y brindaron información que pudo ser contrastada con estaciones de medición en tierra.

El cálculo de las constantes de ajuste del modelo de Tarpley, discriminando las constantes en función del índice de claridad k_t es apropiado para evaluar el recurso solar, mejorando el ajuste entre valores medidos y estimados. De la comparación final entre valores medidos y calculados se alcanzan valores razonables para los errores medios cometidos en las estimaciones diarias: 17,3 % para el error cuadrático medio y 7,1% para los errores medios.

Los errores alcanzados en el cálculo de valores promedios mensuales son, como era de esperar, mejores: 8,9% para los errores cuadráticos medios y -1,4% para los errores medios.

La magnitud de estos errores, sobre todo para valores medios, hace posible el empleo del algoritmo de estimación de la radiación solar global a nivel de superficie. Errores del orden del 9% para los valores cuadráticos medios resultan aceptables para la mayoría de los cálculos de dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento energético de la radiación solar.

También resultan apropiados para su empleo en modelos de crecimiento de cosechas, cálculo de evapotranspiración potencial de suelos y en modelización de procesos biológicos.

El modelo de Tarpley así ajustado fue usado a título de ejemplo para evaluar la radiación solar global diaria a nivel de superficie en plano horizontal en casi toda la provincia de Buenos Aires durante el mes de enero de 2001, mostrando la factibilidad del empleo de la información satelital en la evaluación del recurso solar en áreas extensas de Argentina.

REFERENCIAS

- Barros V. (2004). El cambio Climático Global. Libros del Zorzal. 170 pp.
- Frulla L. A, Grossi Gallegos H., Gagliardini D. A y Atienza G. (1990). Analysis of satellite-measured insolation in Brazil. *Solar & Wind Technology*. Vol 7, 5, pp 501-509.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2002). Alternativa para una evaluación preliminar del recurso solar en zonas aisladas de Latinoamérica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 10, pp 9-14
- Justus C. G y Tarpley J. D. (1984). Atlas of satellite-measured insolation in the United States, Mexico and South America. Technical Report. Georgia Institute of Technology. pp 270.
- Justus C., Paris M. V. y Tarpley J. D. (1986). Satellite-measured insolation in the United States, Mexico and South America. *Remote Sensing of Environment*. 20, pp 57 – 83.
- Righini R. (2004). Empleo de imágenes satelitales GOES 8 en el cálculo de la irradiación solar global en distintas zonas de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 8, 2.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2000 a). Trazado de las cartas solarimétricas de la Pampa Húmeda empleando métodos geoestadísticos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 4, 2. pp. 11.25 -11.29 .
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2000 b). Evaluación de la distribución de la irradiación solar global en la República del Paraguay en base a datos satelitales. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 8. pp 9-12.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2001). Utilización preliminar de información GOES y métodos geoestadísticos para la evaluación del recurso solar en Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 5, 2, pp. 11.19-11.24.
- Righini R. y Grossi Gallegos H (2003)., Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, 2. pp. 11.07-11.11.
- Tarpley J. D. (1979). Estimating incident solar radiation at the surface, from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteorol.* pp 1172 – 1181.

ABSTRACT

The use of satellite images obtained in the visible range of the electromagnetic spectrum for estimate the global solar radiation is studied. The algorithm of Tarpley is used to realise the estimation. The constants of adjustment of the model are obtained using data of earth stations in five places of Argentina. Realising a selective adjustment based on clearness index (kt) average quadratic errors of the order of 17% for daily values and 9% for monthly average values are obtained. Possible applications of the data obtained are shown.

Keywords: solar energy, Tarpley model, GOES 8, satellital picture imaging.