

COMPARACION ENTRE LA DETERMINACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL
MEDIANTE EL SATELITE GEOESTACIONARIO GOES Y LAS MEDICIONES DE LA RED SOLARIMETRICA

L.A.Frulla - D.A.Gagliardini

Centro Argentino de Estudios de Radiocomunicaciones y Compatibilidad
Electromagnética (CAERCEM), Julián Alvarez 1218 -1414 Buenos Aires

H.Grossi Gallegos- R.Lopardo

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales- Centro Espacial San
Miguel- Av. Mitre 3100- 1663 San Miguel - Buenos Aires.

RESUMEN

La importancia de la determinación de la radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre ha ido en aumento en los últimos años. Ello no sólo ha sucedido en el área de la energía no convencional sino también en el estudio y predicción de cosechas. Este tipo de determinaciones básicamente estuvieron hechas mediante piranómetros instalados en tierra teniendo como restricción principal el hecho de que las mediciones son puntuales y para cubrir grandes áreas se hacen necesarios un gran número de sensores. Esta cobertura puede ampliarse en cierta forma mediante correlaciones establecidas entre las mediciones de la radiación y las de parámetros meteorológicos más difundidos. Considerando que este tipo de problemas queda solucionado mediante observaciones satelitarias, en la última década se ha dado mucho énfasis a ésta posibilidad, habiéndose utilizado satélites espaciales y geoestacionarios, siendo éstos últimos los que han dado los mejores resultados. En nuestro país se ha trabajado ya comparando datos de algunas de las estaciones de la Red Solarimétrica con los obtenidos desde satélite. El presente trabajo tiene por objeto estudiar la posibilidad de la determinación de la radiación solar global en la zona norte de la República Argentina en base a datos satelitarios, utili-

zándose valores obtenidos por Carpley a partir de un modelo estadístico que aplica a la información del satélite GOES. Este método está basado en el estudio de la modulación de la radiación solar en su recorrido a través de la atmósfera y en el principio de conservación de energía. Se comparan aquí los valores diarios obtenidos en 1982 y 1983 en trece estaciones de la Red Solarimétrica en la zona indicada, calificándose la bondad del ajuste de acuerdo a los valores del índice de claridad kt. Se comparan también los valores horarios estimados durante los mismos años con los medidos en la Estación de San Miguel.

1. INTRODUCCION

La radiación solar, antes de su llegada a la superficie terrestre, se ve afectada en distintas formas debido a su interacción con los componentes atmosféricos. Los procesos de absorción y dispersión que éstos provocan introducen una atenuación de la componente directa y generan un significativo flujo de radiación difusa (1). Los absorbentes que juegan el rol más importante son el vapor de agua (2) y los aerosoles, mientras que la dispersión se produce por choques tipo Rayleigh con moléculas atmosféricas y por choques tipo Mie con aerosoles.

La medición de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre se lleva a cabo mediante piranómetros, o puede ser estimada a partir de correlaciones establecidas entre los valores de la radiación y los parámetros meteorológicos más difundidos, tales como la heliofanía, cubrimiento de nubes y cantidad de agua precipitaba (3-10), extendiendo en cierta forma la cobertura dada por los sensores de radiación.

El principal inconveniente que presentan ambas metodologías es que las mediciones son puntuales y en general las distancias entre las estaciones son lo suficientemente significativas como para que se modifiquen las condiciones meteorológicas, traduciéndose en falta de precisión en los valores que resultan de la interpolación o extrapolación (11).

Teniendo en cuenta estas dificultades, en la última década se han hecho varios intentos de efectuar este tipo de medición desde satélites mediante radiómetros embarcados en los mismos (12-21), utilizándose satélites polares y geoestacionarios. Estos

últimos son los que han dado los mejores resultados, en particular por realizar mediciones cada media hora; estos datos han sido correlacionados ya en dos ocasiones anteriores con los de la Red Solarimétrica (22,23).

2. DESCRIPCIÓN DEL SATELITE GOES (ESTE VISSR).

El SMS/GOES (Synchronous Meteorological Satellite/Geostationary Operational Environmental Satellite) es un satélite meteorológico que está localizado a una distancia de aproximadamente 37500 km sobre Ecuador, a 75° Oeste de longitud, y se conoce con el nombre de GOES-Este. Orbita sobre el Ecuador y acompaña a la Tierra en su movimiento de rotación, logrando de esta forma permanecer siempre sobre el mismo lugar geográfico. Su campo de visión cubre según se puede ver en la figura 1, desde Norte hasta 60° Sur de latitud. Debido a la gran extensión del área barrida, la limitación fundamental que presenta este satélite está dada por el efecto de curvatura terrestre que se va acentuando hacia los polos.

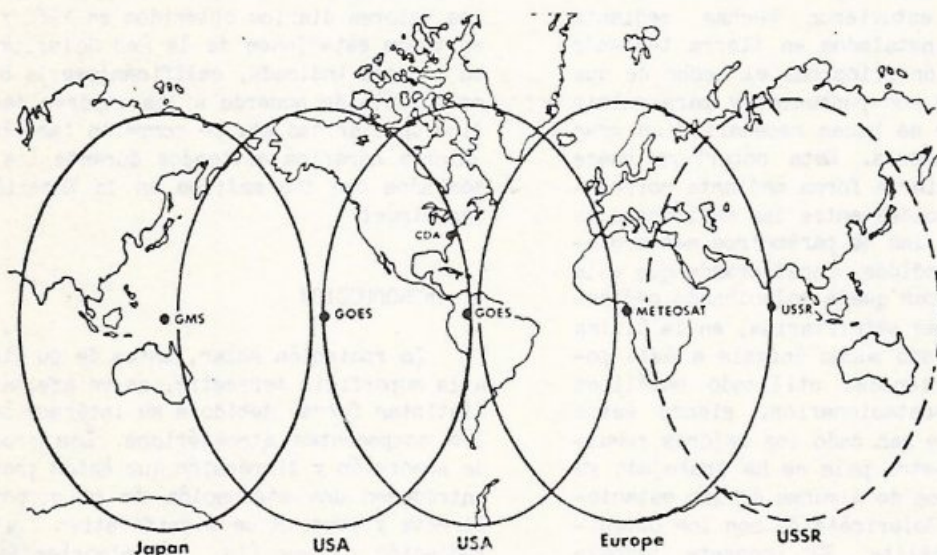


Figura 1. Distribución de satélites GOES.

El elemento más importante de este sistema es el sensor, que es del tipo Visible and Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR). La radiación electromagnética que alcanza al sensor es distribuida a lo largo de líneas de exploración adyacentes, en forma simultánea con el movimiento de rotación del satélite. Este realiza dicho movimiento alrededor de su eje de simetría, que se halla orientado en forma casi paralela al eje de rotación terrestre. Las exploraciones se realizan de forma de obtener una línea de exploración por radiómetro, cada uno de los cuales colecta los datos distribuyéndolos en forma adyacente en el conjunto de líneas de exploración (24). El VISSR opera en dos canales:

- Canal VIS: está compuesto por ocho radiómetros que abarcan el intervalo de 0,55 a 0,7 μ m del espectro electromagnético. En la figura 2 se puede observar la curva que describe la respuesta normalizada de este canal en función de la longitud de onda (25).
- Canal IR: está compuesto por dos radiómetros que abarcan el intervalo de 10,5 a 12,6 μ m del espectro electromagnético. Estos radiómetros se efectivizan en 1, pues ambos cubren la misma área para cada exploración.

El hecho de que sea realizada una sola línea de exploración por revolución del sa-

télite en el canal IR, cubriendo el mismo ancho que las 8 líneas de exploración en el canal VIS, se traduce en una disminución significativa en la resolución espacial. Es decir, el canal IR presenta una resolución espacial de 8 km aproximadamente en el nadir, mientras que canal VIS resuelve 0,8 km en la misma ubicación.

De acuerdo con las características del sensor, se obtiene una transmisión de datos cada 30 minutos: como el satélite rota a 100 rpm, le lleva 18,2 minutos producir una imagen digital a disco lleno.

La información obtenida mediante este sensor está dada en forma de conteo. La calibración del VISSR está hecha mediante un sistema que asegura la precisión de la misma de manera independiente con los cambios producidos en el área observada y las condiciones de contorno del sensor. El producto final del procedimiento de calibración es conteo en función de la temperatura, para el canal IR, y conteo en función de albedo, para el canal VIS. El rango de conteo está comprendido dentro del intervalo de 0 a 255 cuentas, para el primer caso, y de 0 a 63 cuentas, para el segundo. Más detalles concernientes a la colección y control de calidad del satélite en los experimentos de determinación de la radiación solar global se pueden encontrar en la bibliografía (26,27), mientras que las características generales del sistema se encuentran resumidas en la tabla 1.

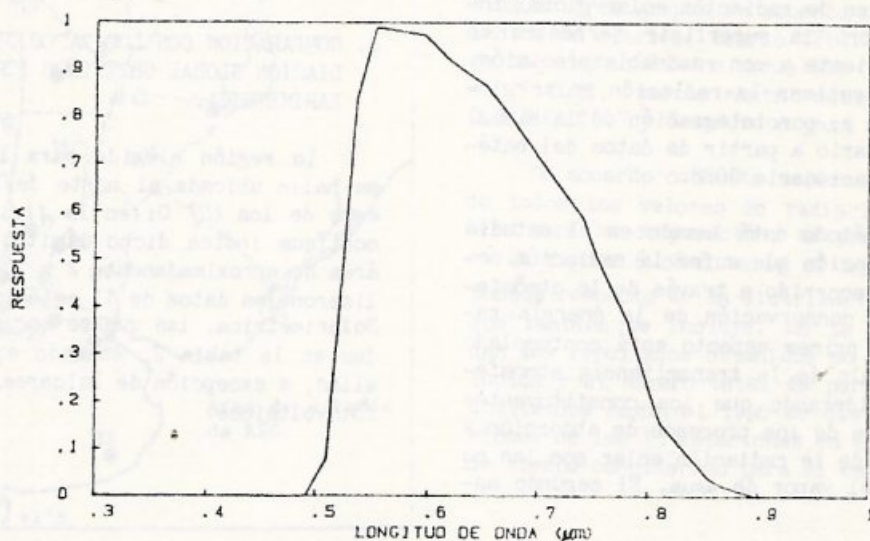


Figura 2. Respuesta normalizada del sensor VISSR.

CANALES	VIS	IR
cantidad de radiómetros.	8	2
cantidad de líneas de exploración.	8	1
rango espectral (μm).	0,55-0,70	10,5-12,6
resolución espacial en el nadir (km).	0,8	8
conversión de conteaje a.	albedo	temperatura
rango de conteaje (cuentas)	0-63	0-255

Tabla 1: Características generales del sensor VISSR

3. DETERMINACION DEL FLUJO DE RSG DESDE SATELITE.

Tarpley (18) ha desarrollado un modelo estadístico mediante el cual se pueden calcular valores de radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre de manera eficiente y con razonable precisión. El permite estimar la radiación solar global horaria y, por integración de la misma, el valor diario a partir de datos del satélite geostacionario GOES.

Este método está basado en el estudio de la modulación que sufre la radiación solar en su recorrido a través de la atmósfera y en la conservación de la energía radiante; el primer aspecto está contemplado en el cálculo de la transmitancia atmosférica, considerando que los constituyentes responsables de los procesos de absorción y dispersión de la radiación solar son las moléculas y el vapor de agua. El segundo as-

pecto es utilizado al dividir el flujo radiante en tres componentes: una reflejada hacia el espacio, otra absorbida por la atmósfera y la restante, absorbida por la Tierra.

Mediante una experiencia realizada en Great Plains (EE.UU) utilizando la información del satélite y de 25 piranómetros instalados en tierra, Tarpley puso a punto su modelo obteniendo coeficientes apropiados mediante métodos de regresión. Los valores de dichos coeficientes dependen del tipo de suelo, de la climatología del lugar y de la ubicación con respecto al Sol y al satélite.

Dado que el satélite cubre prácticamente todo el continente americano, con el modelo se podrían realizar estimaciones en cualquier lugar del mismo. En particular, como se indica en la figura 3, se realizó en el sur de Brazil y en la mitad norte de Argentina. En estos casos, el método se aplicó sin tener en cuenta las características geográficas de estas regiones, ya que utilizaron los mismos coeficientes de regresión determinados en la experiencia realizada sobre Great Plains.

4. COMPARACION CON LOS DATOS DIARIOS DE RADIACION GLOBAL OBTENIDOS POR LA RED SOLARIMETRICA.

La región elegida para la comparación se halla ubicada al norte de los 40°S y al este de los 67° O; en la figura 4 la línea continúa indica dicho límite, cubriendo una área de aproximadamente 2×10^6 km². Se utilizaron los datos de 13 estaciones de la Red Solarimétrica, las que se encuentran indicadas en la tabla 2, estando equipadas con termopilas, a excepción de Falcarse, con sensores fotovoltaicos.

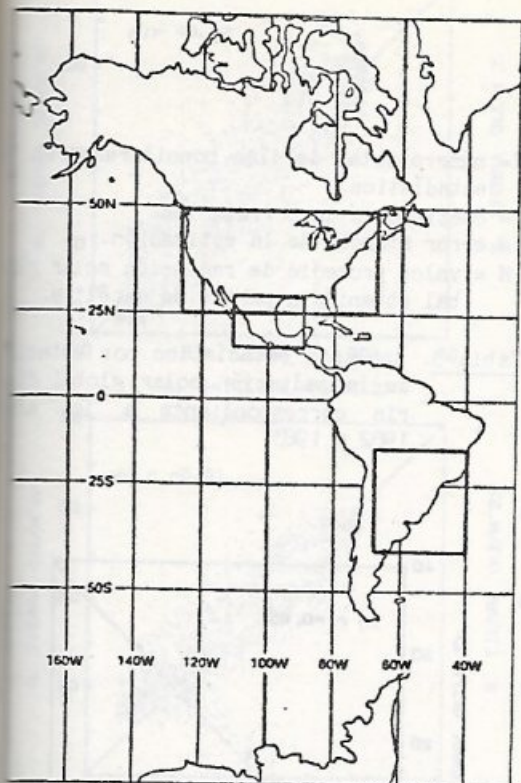


Figura 3. Regiones en las que se estima radiación solar global mediante el modelo de Tarpley.

N°	ESTACION	(°S)	(°W)
9	Famallá	27°03'	63°25'
10	El Sombrerito	27°39'	58°46'
11	Cerro Azul	27°39'	55°26'
15	Mercedes	29°10'	58°01'
17	Rafaela	31°17'	61°33'
20	Paraná	31°50'	60°31'
22	Marcos Juárez	32°41'	62°51'
23	Oliveros	32°33'	60°51'
25	Villa Mercedes	33°43'	65°29'
28	San Miguel	34°33'	58°44'
31	Anguil	36°30'	63°59'
33	Bacarce	37°45'	58°13'
35	Alto Valle	39°01'	6°40'

Tabla 2. Estaciones de medición de radiación solar global en la Rep. Argentina.

En la tabla 3 se listan los resultados obtenidos en la comparación, como así también la cantidad de días que fueron considerados en la estadística durante los años 1982 y 1983 para cada estación. La dispersión standard obtenida es de aproximadamente 15 a 20% de los valores promedio.

La figura 5 muestra dos ejemplos gráficos, en donde la línea diagonal representa la coincidencia entre valores determinados desde satélite y desde tierra.

La presencia de nubes determina la diferencia entre los valores de radiación medidos desde tierra y estimados desde satélite. Para calificar el ajuste clasificaron los días en tres grupos de acuerdo al valor del índice de claridad diario (K_t). Se consideraron días nublados aquellos en los que $K_t < 0,35$, parcialmente nublados cuando $0,35 \leq K_t \leq 0,7$ y despejados para $K_t > 0,7$.

De acuerdo con esta selección, reuniendo todos los valores de radiación disponibles para la comparación, se puede observar en la figura 6 cómo varía el ajuste de los puntos respecto de la distribución original que también se incluye. En la tabla 4 se dan los resultados obtenidos en cada correlación y el número total de pares de datos utilizados según el tipo de día para mediciones de las 13 estaciones en el intervalo de tiempo considerado para el estudio.

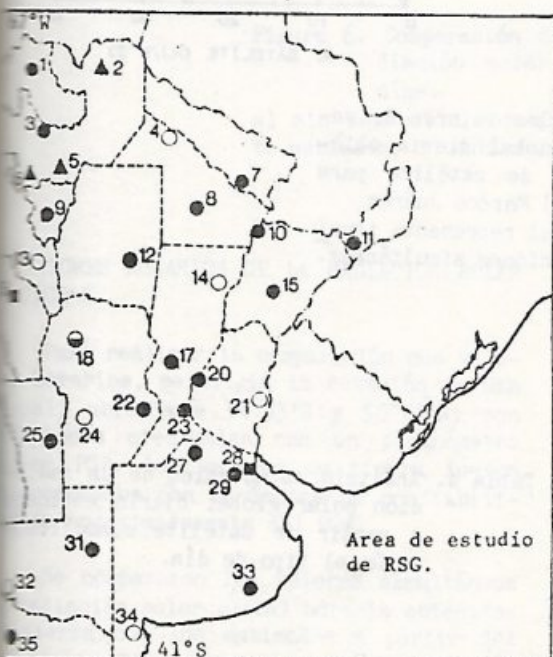


Figura 4. Distribución de piranómetros en la República Argentina.

Estación	N(días)	r	σ (Mj/m)	H (Mj/m)
9	408	0,95	2,7	15,7
10	459	0,93	3,2	16,6
11	490	0,90	3,3	15,3
15	490	0,94	2,8	16,4
17	489	0,91	3,3	16,4
20	435	0,91	3,3	17,5
22	482	0,95	2,6	16,2
23	500	0,93	2,7	16,2
25	195	0,85	4,3	17,5
28	499	0,93	3,0	17,8
31	326	0,93	2,9	16,0
33	323	0,91	3,6	14,7
35	226	0,93	3,5	17,8

N= número total de días considerados en la estadística.

r= coeficiente de correlación.

σ = error estándar de la estimación.

H = valor promedio de radiación solar global obtenida a partir de satélite.

Tabla 3. Análisis estadístico por estación de la radiación solar global diaria correspondiente a los años 1982 y 1983

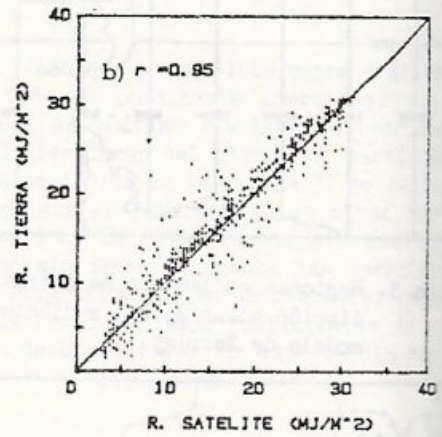
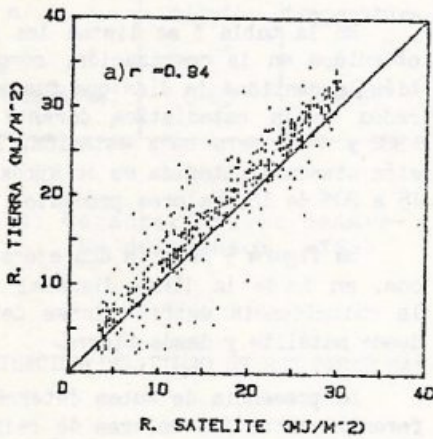


Figura 5. Comparación de los valores de radiación solar global diaria obtenidos a partir de satélite para a) Mercedes, b) Marcos Juárez. La línea diagonal representa igualdad de las mediciones simultáneas.

días	sin selección.	con selección		
		claros	p.nublados	nublados
N	5322	639	3486	1197
r	0,92	0,96	0,91	0,59
σ (Mj/m)	3,2	1,9	2,7	2,6
H (Mj/m)	16,2	21,5	18,1	17,8

Tabla 4. Análisis estadístico de la radiación solar global diaria estimada a partir de satélite clasificada según el tipo de día.

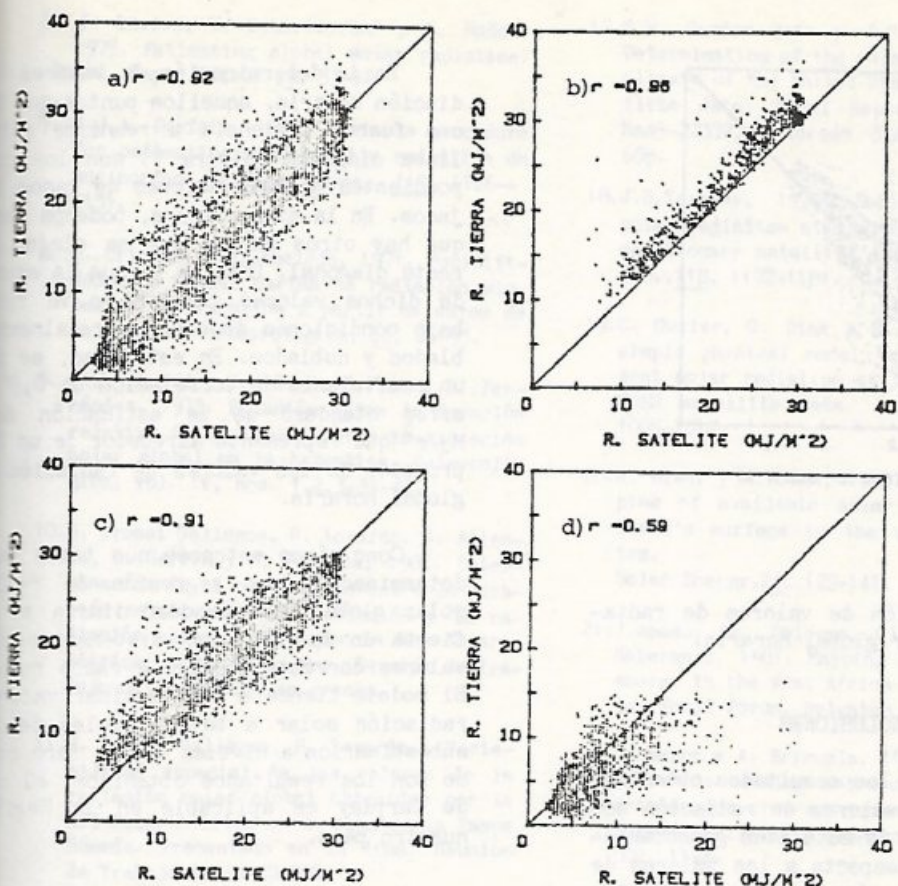


Figura 6. Comparación de los valores de radiación solar global diaria para días.

a) sin selección, b) claros, c) parcialmente nublados, d) nublados.

VALORES HORARIOS DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL.

Para realizar la comparación con valores horarios, se eligió la estación de San Manuel, ubicada a $34^{\circ}33'S$ y $58^{\circ}44'W$, con mediciones efectuadas con un piranómetro Tarpley PSP. Los valores de tierra fueron seleccionados con un índice de confiabilidad de aproximadamente del 90%.

Se compararon los valores simultáneos de radiación solar global horaria obtenidos en tierra con los estimados a partir del modelo de Tarpley. Los resultados de la comparación aparecen en la tabla 5, en don-

de se aclara la cantidad de valores que intervinieron en la estadística durante los años 1982 y 1983, mientras que en la figura 7 se puede observar la distribución de puntos obtenida.

N	4195
r	0,87
σ (Mj/m)	0,5
H (Mj/m)	1,3

Tabla 5. Análisis estadístico de la radiación solar global horaria estimada a partir de satélite.

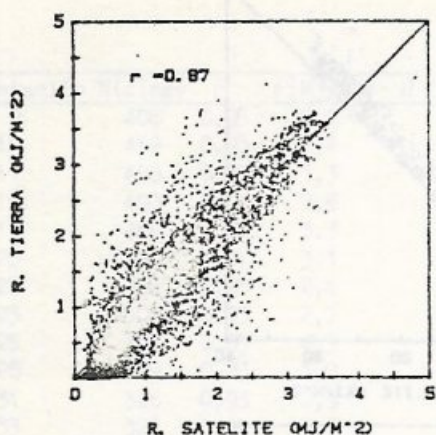


Figura 7. Comparación de valores de radiación solar global horaria.

6. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos es posible inferir valores de radiación solar global a partir de satélites geoestacionarios. En lo que respecta a los valores de radiación diaria, se obtuvieron coeficientes de correlación del orden de 0,9 y errores standard de la estimación entre 15 y 20% de los valores promedio. Por otra parte, si bien los puntos no se distribuyen preferentemente sobre la recta diagonal, la relación entre ambos tipos de mediciones (desde tierra y desde satélite) presenta un notable comportamiento lineal. Este hecho es el que permite en definitiva, decidir la aplicabilidad del modelo de Tarpley en la región de nuestro país.

Con respecto a la clasificación de días realizada, se observa que para el caso de valores de radiación diarios, se obtuvo para días despejados, un coeficiente de correlación de 0,96 y un error standard en la estimación de 1,9 Mj/m^2 que representa alrededor de un 8% del promedio. En cambio, para días parcialmente nublados y nublados, los errores standard de la estimación fueron de 14 y 33% de los valores promedio respectivamente. De este resultado se deduce que el problema más significativo en esta técnica es la sobreestimación de valores de radiación solar global en días nublados.

En la determinación de valores de radiación horaria, aquellos puntos que tienen una fuerte tendencia a reunirse sobre la línea diagonal (figura 7) son los correspondientes a observaciones de casos despejados. En la misma figura, podemos observar que hay otros puntos que se alejan de la recta diagonal. Esto es porque la exactitud de dichos valores también se ve reducida bajo condiciones de casos parcialmente despejados y nublados. En este caso, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,9 y un error standard de la estimación de 1,9 Mj/m^2 que representa alrededor de un 8% del promedio de los valores de radiación solar global horaria.

Concluimos entonces que tanto para la determinación por regresión de radiación solar global horaria como diaria se evita en cierta medida un fuerte error sistemático en los valores correspondientes a casos nublados. El modelo tiende a sobreestimar valores de radiación solar a bajos niveles de nubosidad y subestimarlos a niveles altos. Pero como se ve con los resultados obtenidos, el modelo de Tarpley es aplicable en la Región de nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

1. R.E. Bird, 1984. A simple, spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 32, N° 4, 461-471.
2. J.E. McDonald, 1960. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor. *J. Meteor.*, 117, 319-328.
3. A. Angstrom, 1924. Solar and terrestrial radiation. *Q.J. Roy. Met. Soc.* 50, 121-126.
4. M. Atwater y P.S. Brown Jr., 1974. Numerical computations of the latitudinal variation of solar radiation for a clear atmosphere of varying opacity. *J. Meteor.*, 13, 289-297.
5. ——— y J.T. Ball, 1973. Integrational variations of solar radiation in the Eastern United States. *Appl. Meteor.*, 17, 1116-1125.

6. J. Davies, W. Schertzerand y M. Nuñez, 1975. Estimating global solar radiation. *Bound. Layer Meteor.*, 9, 33-52.
7. K.J.A. Revfeim, 1978. A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. *J.Appl.Meteor.*, 17, 1126-1131.
8. E. Crivelli y H. Abeledo, 1971. Posibilidades de trazar cartas de radiación global en la Argentina a partir de datos de heliofanía. *Meteorológica*, II, 86-93.
9. J.H. Abeledo, M.I.C. de Kurlat y R. Fernández, 1973. Relación entre la duración relativa de la insolación y la radiación solar global en la Argentina. *Meteorológica*, vol. IV, nos. 1,2,3,31-43.
- 10.H. Grossi Gallegos, R. Lopardo. G. Atienza, M. Garcia y M. Peralta, 1984. Determinación de la correlación entre la duración relativa de la insolación y la radiación global medida por la Red Solarimétrica. *Actas de la 9na. Reunión de Trabajo de la ASADES*, en prensa.
- 11.H. Grossi Gallegos, R. Lopardo. Variabilidad espacial de los valores de la radiación solar global obtenidos por la Red Solarimétrica en la zona de la Pampa Húmeda. Presentado en la 10ma. Reunión de Trabajo de la ASADES.
- 12.K.J. Hanson, T.H. Vonder Haar y V.E. Suomi, 1967. Reflection of sunlight to space and absorption by the Earth and Atmosphere over United States during spring 1962. *Mon. Wea. Rev.*, 95, 354-362
13. ———, 1971. Studies of cloud satellite parametrization of solar irradiation at the Earth's surface. *Proc. Miami Workshop on Remote Sensing*, U.S. Department of Commerce, 133-148.
- 14.T. Vonder Haar, E. Rashke, W. Bandeen y M. Pasternak, 1973. Measurements of solar energy reflected by the Earth and atmosphere from meteorological satellites. *Solar Energy*, 14, 175-184.
15. ———, y J.S. Ellis, 1975. Solar energy microclimate as determined from satellite observations. *Proc.Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 68, 18-22.
16. D.V. Hoyt, 1976. The radiation and the energy budget of the Earth using both ground-based and satellite-derived values of total cloud cover. *NOAA Tech. Rep.ERL 362-ARL*,124p.
- 17.T.H. Vonder Haar y J.S. Ellis, 1976. Determination of the solar energy microclimate of the United States using satellite data. Final Report, NASA Grant Nas5-22372, Colorado State University, 68p.
- 18.J.D.Tarpley, 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J.Appl. Meteor.*, 18, 1172-1181.
- 19.C. Gutier, G. Diak y S. Masse, 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J.Appl.Meteor.*, 19, 1005-1012.
- 20.H. Hiser y H. Senn, 1980. Mesoscale mapping of available solar energy at the Earth's surface by the use of satellites. *Solar Energy*, 24, 129-141.
- 21.J. Amado, Ch. Delorme, Cl. Delorme y P. Raberanto, 1981. Mapping available solar energy in the West Africa. *proc. ISES Solar World Forum*, Brighton, 3, 2485-2489.
- 22.C. Espoz y A. Brizuela, 1983. Application of remote sensing and aerometeorological methods for crop assessment in the Pampa Húmeda. *Fellowship Program Report-Arg 81/002*, 112p.
- 23.L. Frulla, D.A. Gagliardini, H. Grossi Gallegos y R. Lopardo, 1984. Determinación de la radiación solar global mediante el satélite geostacionario GOES: comparación con mediciones hechas desde tierra. Presentado en el V Simposio Nacional de Análisis de Imágenes Satelitarias, Buenos Aires, 26. al 30 de Noviembre de 1984.
- 24.P. Cornillon, 1982. A guide to environmental satellite dat. *NOAA/Sea Grant. University of Rhode Island Marine Technical Report 79*.
- 25.P.Halpern, 1984. Ground level solar energy estimates using geostationary operational environmental satellite measurements and realistic model atmospheres. *Remote Sensing of Environ.* 15, 47-61.
- 26.C.L. Bristor, 1975. Central processing and analysis of geostationary satellite data. *NOAA Tech. Memo. NESS 64*,155p.
- 27.J.D. Tarpley, R. Stanley, J. Schneider, E. Bragg y M.P. Waters, III, 1978. Satellite data set for solar incoming radiation studies. *NOAA Tech. Memo.* 96,36p.