

ACERCA DE LA REPRESENTATIVIDAD TEMPORAL DE LOS VALORES DE  
RADIACION SOLAR GLOBAL MEDIDOS POR LA RED SOLARIMETRICA

H. Grossi Gallegos\* y G. Atienza\*

RESUMEN

Si bien para el estudio del comportamiento a largo plazo de sistemas solares a menu do se requiere sólo el conocimiento de los valores medios mensuales de la radiación solar disponible, es necesario conocer qué tan representativos del valor verdadero son dichos valores, determinados a partir de muestras de variada longitud. Dado el grado de variabilidad interanual que es dable observar en los datos medidos en cada estación solarimétrica, en el presente trabajo se inicia su estudio para poder deter minar la longitud requerida en los registros para producir valores medios de la muestra que difieran de la media poblacional en menos de un valor prefijado. Se ana lizan los resultados obtenidos para algunas estaciones de la Red Solarimétrica y se comentan las posibles fuentes de complicación.

1. INTRODUCCION

A fines de 1978 comenzaron a instalarse en Argentina las primeras estaciones pirano métricas de la Red Solarimétrica, contando con el apoyo de la Organización de los Estados Americanos (OEA) como parte del Proyecto Especial No. 10 del Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico (PRDCYT). Desde entonces, el número de estaciones ha ido aumentando y, por ende, la cantidad de datos obtenidos.

Si bien para el estudio del comportamiento a largo plazo de sistemas solares a menu do se requiere sólo el conocimiento de los valores medios mensuales de la radiación solar disponible, es necesario conocer qué tan representativos de la media poblacional (eso es, de la media verdadera) son dichos valores, calculados a partir de una muestra de longitud dada.

Varios autores han sugerido y utilizado una técnica determinada para especificar la longitud necesaria de los registros (1,2), aunque ignorando características típicas de las series temporales como la persistencia y la no normalidad de las distribuciones de frecuencia de valores diarios de energía. Dichas características causan complicaciones en el cálculo, enmascarando los valores y motivando la necesidad de un aumento de la longitud requerida.

La utilización de imágenes satelitarias para el relevamiento del recurso solar a ni vel de mesoescala ha despertado un gran interés dada su alta resolución espacial, no sólo en aquellos países que no disponen de redes terrestres de medición sino también en aquéllos que, como Argentina, están midiendo la radiación proveniente del Sol pero no con la cobertura apropiada a nivel de mesoescala (3). También para este tipo de mediciones son válidas las afirmaciones del párrafo anterior, si bien ya en un trabajo en el que se presentaron mapas mundiales con la distribución de la radiación global relativa se intentó evaluar dicha representatividad (4).

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

+ Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales, Centro Espacial San Miguel, Avda. Mitre 3100, (1663) San Miguel, Buenos Aires.

## 2. METODOLOGIA

Si se quiere estimar el valor medio o esperanza matemática  $E(X)$  de una variable aleatoria  $X$ , cualquiera sea su función de probabilidad, recordando la desigualdad de Tchebycheff (5) es posible escribir:

$$P(|\bar{X} - E(X)| \geq \epsilon) \leq \frac{\sigma^2(X)}{n \epsilon^2} \quad (1)$$

en donde  $\bar{X}$  es el estimador (calculado sobre una muestra de tamaño  $n$ ),  $\sigma^2(X)$  es la varianza y  $\epsilon$  el nivel de precisión fijado. Esta relación expresa que, al tomar al estimador por el valor medio, el error que se comete converge a cero en probabilidad. Por lo tanto, el estimador es tanto mejor cuanto mayor sea el tamaño de la muestra.

Suponiendo que el valor medido cada día dentro de un determinado mes sea un elemento del espacio muestral que tiene una cierta probabilidad de ocurrencia, si el interés reside en determinar el valor medio que puede tomar dicha variable el problema consiste entonces en calcular el tamaño de la muestra que permita su determinación dentro de un prefijado nivel de confiabilidad (NC).

Se pueden fijar diferentes niveles de confiabilidad: el número de casos necesarios dependerá estrechamente de dicha elección una vez conocida (o estimada) la varianza y fijado el nivel de precisión, siendo inversamente proporcional a la misma.

En consecuencia, la expresión utilizada en este trabajo es:

$$n \geq \frac{\sigma^2(X)}{NC \cdot \epsilon^2} \quad (2)$$

## 3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos diarios obtenidos por la Red Solarimétrica fueron procesados para cada localidad, para cada mes, utilizando todos los años en que hubo registros. Si en un dado mes se observó la pérdida de cinco o más datos diarios, dicha muestra mensual fue eliminada para evitar el error no acotado que podría introducir en el cálculo del valor medio ese apartamiento de la completitud (6). Cuando la pérdida fue inferior a la citada cantidad se usó un método de regresión lineal para cubrirla: con los datos diarios de heliofanía relativa (a nivel mensual) se determinaron los coeficientes de ajuste en la correlación con el coeficiente de claridad  $K_T$ , eliminándose en sucesivas corridas los pares de valores para los que el valor medido difería en más de 1,644 $\sigma$  (nivel de confianza del 90%) del estimado. Si bien el error que introducen estas relaciones para valores diarios individuales las hace poco prácticas para propósitos de validación de información (7), es posible de esta forma dar continuidad a las series, mejorando la estimación que se podría realizar por interpolación lineal de valores adyacentes (lo que involucra suposiciones acerca de los cambios temporales de la variable y que resulta aceptable sólo bajo condiciones de cielo claro). Un método quizás más adecuado, pero que complica el estudio en esta etapa, sería tener en cuenta la autocorrelación de la serie de datos y completar la secuencia temporal (por modelos ARMA, máxima entropía o máxima probabilidad).

## 4. NIVEL DE PRECISION Y RESULTADOS

Una de las posibilidades usuales es fijar el nivel de precisión en un dado valor único para todas las localidades y para todos los meses del año. En este caso, se adoptó como nivel el valor 1,5 MJ/m<sup>2</sup>-día que corresponde aproximadamente al 6% del

máximo valor medio mensual de la radiación medida en nuestro país (8).

De esta manera, y para un nivel de confiabilidad del 95%, se calculó el número de años necesarios para cumplir el requisito de que el estimador difiera del valor promedio verdadero en menos del error elegido. En la Tabla 1 se presentan los resultados hallados para cada mes en un conjunto de estaciones de la Red Solarimétrica.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cerrillos	10.7	14.1	10.3	7.8	5.4	5.3	5.7	8.3	12.2	14.5	15.7	13.5
San Carlos	4.9	5.7	4.3	2.5	1.7	0.3	0.8	1.1	2.7	7.7	11.3	5.9
El Colorado	11.0	8.1	8.7	9.3	6.3	6.0	5.1	6.8	9.4	11.5	16.7	13.3
Pcia. R. S. Peña	13.0	11.3	10.7	10.3	6.2	7.0	6.5	7.8	11.5	15.2	18.4	14.3
Famailá	35.3	17.5	17.1	10.1	5.8	6.7	6.4	8.7	10.3	15.1	22.4	16.6
El Sombrerito	13.4	13.5	12.8	10.7	6.6	6.3	6.7	8.5	17.3	17.3	23.3	13.9
Cerro Azul	10.1	10.5	8.9	9.9	7.1	6.1	6.5	9.7	13.9	16.0	18.4	8.6
Mercedes	11.2	16.4	13.3	8.6	4.8	4.4	5.3	6.4	11.7	15.7	19.9	12.9
San Juan	8.0	6.3	6.6	4.8	2.0	3.6	3.4	6.3	5.1	4.9	5.6	5.5
Mafaela	11.1	16.0	9.3	7.3	4.7	4.1	4.7	6.6	8.7	11.8	16.4	12.9
Paraná	11.8	15.5	9.9	8.0	4.4	3.8	4.4	7.5	10.5	11.9	16.2	14.9
Marcos Juárez	11.3	17.0	7.7	7.0	3.9	3.5	3.4	5.0	9.4	10.8	17.2	14.2
Oliveros	15.4	19.5	10.4	6.1	4.0	3.8	4.2	5.4	9.8	11.7	13.9	12.8
San Miguel	10.9	13.2	7.6	7.6	4.0	2.9	3.7	5.1	8.2	12.6	16.6	9.8
Rama Caída	12.5	2.2	8.6	7.5	2.6	3.1	3.1	3.7	9.7	7.9	12.7	7.0
Alto Valle	14.1	6.9	6.3	5.9	3.0	1.8	2.8	3.7	9.2	8.5	10.4	8.6

Tabla 1. Longitud de los registros (años) necesaria para establecer el valor medio con una diferencia de 1,5 MJ/m<sup>2</sup>-día con el valor verdadero con un nivel de confiabilidad del 95%.

Se puede observar que en un 75% de los casos el mes de noviembre es el que presenta mayor variabilidad. Si el nivel de confianza se fijara en un 90%, los resultados hallados deberían dividirse por dos, con lo que prácticamente todas las estaciones analizadas cumplirían el requisito establecido o lo harían en muy poco tiempo más, dependiendo ello de la época del año que se analice.

Otra posibilidad de elección consiste en especificar que la diferencia no exceda el error instrumental que, en el caso de la Red Solarimétrica, fue estimado en el 6% debido a la presencia de los sensores fotovoltaicos (9).

Repetido el cálculo para esta elección se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 2 (para un nivel de confiabilidad del 67%) y en la Tabla 3 (para un nivel de confiabilidad del 90%). Se puede observar en estos casos un marcado aumento de la longitud requerida de los registros.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cerrillos	3	4	4	5	4	5	4	5	5	4	4	4
San Carlos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	2
El Colorado	3	2	3	6	8	9	7	6	5	4	5	3
Pcia. R. S. Peña	3	3	4	6	6	8	6	5	5	4	4	3
Famaillá	8	5	10	8	6	9	7	7	5	5	7	5
El Sombrerito	3	3	4	5	5	7	6	5	7	5	5	3
Cerro Azul	3	3	3	6	6	8	6	7	7	5	5	2
Mercedes	2	4	4	4	3	5	5	4	5	4	4	2
San Juan	1	1	2	2	1	3	3	3	2	1	1	1
Rafaela	2	4	3	4	5	5	5	5	4	3	4	3
Paraná	2	4	3	5	4	5	5	5	4	3	4	3
Marcos Juárez	2	4	3	5	5	6	5	4	4	3	4	3
Oliveros	3	5	3	4	4	7	6	5	5	3	3	3
San Miguel	2	3	3	6	6	6	6	5	4	4	4	2
Rama Caída	2	1	3	4	3	5	4	3	4	2	3	1
Alto Valle	2	2	2	5	5	5	6	4	5	2	2	2

Tabla 2. Longitud de los registros (años) necesaria para establecer el valor medio con una diferencia del 6% con el valor verdadero (nivel de confianza del 67%).

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cerrillos	8	13	13	14	12	15	11	15	14	12	13	11
San Carlos	4	4	3	3	3	1	2	2	3	6	8	4
El Colorado	8	7	10	19	25	28	22	19	15	13	15	10
Pcia. R. S. Peña	8	8	11	19	17	25	19	16	14	13	12	9
Famaillá	24	16	31	26	17	30	23	21	15	16	20	15
El Sombrerito	8	9	11	16	15	21	18	16	23	14	16	8
Cerro Azul	7	9	9	17	18	24	20	23	21	16	16	6
Mercedes	6	12	10	12	10	15	14	11	14	11	11	6
San Juan	4	4	3	3	3	1	2	2	3	6	8	4
Rafaela	6	12	9	13	14	17	16	15	11	10	11	7
Paraná	7	11	9	14	13	15	14	17	13	10	11	8
Marcos Juárez	3	13	7	14	14	17	14	12	12	9	32	8
Oliveros	9	15	10	11	13	21	18	15	15	10	10	8
San Miguel	7	10	8	17	17	19	20	15	13	13	13	6
Rama Caída	7	2	8	13	7	15	11	7	11	6	7	3
Alto Valle	7	4	7	16	17	14	20	11	15	7	6	4

Tabla 3. Longitud de los registros (años) necesaria para establecer el valor medio con una diferencia del 6% con el valor verdadero (nivel de confianza del 90%).

## 5. COMENTARIOS

Si bien la longitud necesaria para obtener valores medios que no difieran del valor verdadero en más de un cierto valor es elevada, dependiendo ello de la precisión y del nivel de confianza elegidos, en este primer trabajo se han dejado de lado algunas características observables en las series de radiación global diaria (tales como la persistencia y la no normalidad de las distribuciones de frecuencia) que acortan en algo la duración.

Cabe recordar que en reuniones anteriores ya se informó acerca del apartamiento de la normalidad que se observara en las distribuciones de frecuencia de datos diarios (6, 10). Tal como lo hiciera nota Bennett (11), estas distribuciones son generalmente asimétricas, llegándose a observar, en algunos lugares y para algunas épocas del año, distribuciones bimodales.

Por otra parte, es evidente que la persistencia de ocurrencia de valores diarios de radiación solar causa complicaciones en la estimación de la varianza de la serie temporal: una serie con valores consecutivos persistentes no provee tanta información como lo hace una serie de valores consecutivos al azar. Por lo tanto, el efecto es aumentar la longitud necesaria de los registros para cumplir determinados niveles de confianza y precisión.

La combinación de distribuciones no simétricas (e inclusive bimodales) con fenómenos de persistencia complica el cálculo de las longitudes mínimas que deben tener estas series temporales para que se n representativas. Así se concluyó en un trabajo realizado para la ciudad de St. Paul, Minnesota, EEUU (12), en el se analizaron 17 años de radiación solar global diaria, determinándose el grado de persistencia en ellos. Teniéndolo en cuenta y corrigiendo de esta manera la varianza, se calculó para cada mes el tamaño de la muestra necesario para estimar la radiación solar media verdadera dentro de un error de 1,04 MJ/m<sup>2</sup>-día con un nivel de confianza del 95%, observándose una marcada disminución en las longitudes requeridas a las series, llegando en algunos casos a la mitad o a la tercera parte de la calculada inicialmente.

Por lo tanto, el trabajo a encarar en lo inmediato será el estudio de estas características en las series de datos solares obtenidas en cada localidad para poder precisar, con criterio estadístico, la longitud necesaria de las series y poder estimar así el valor medio con un prefijado nivel de precisión y dentro de niveles de confianza dados, acotando de esta manera los errores que se cometen al no tener en cuenta la representatividad de los promedios adoptados.

## 6. AGRADECIMIENTOS

La realización del presente trabajo no hubiera sido posible sin la valiosa colaboración de Manuel Peralta, Graciela Renzini de Cardoso y Griselda Roselot. A todos ellos nuestro sincero agradecimiento.

## REFERENCIAS

1. J.N. Black, Some aspects of the climatology of solar radiation. Paper E/CONF. 35/513, Proc. U.N. Conference in New Sources of Energy, Rome, Italy, pp. 311-316 (1987).
2. J. Hay, An analysis of solar radiation data for selected locations in Canada. Climatological Studies No. 32, Atmospheric Environment, Downsview, Canada, 158p. (1979).
3. L. Frulla, A. Gagliardini, H. Grossi Gallegos, R. Lopardo and J.D. Tarpley, Incident solar radiation on Argentina from the geostationary satellite GOES: comparison with ground measurements. Solar Energy, vol. 41 No. 1, pp.61-69 (1988).

4. Organización Meteorológica Mundial, Aspectos meteorológicos de la radiación solar como fuente de energía. Anexo: Mapas mundiales de la radiación global relativa. Nota Técnica No. 172, OMM-857, Ginebra, Suiza (1981).
5. L.A. Santaló, Probabilidad e inferencia estadística. Monografía No. 11, Serie de Matemáticas, OEA, PRDCYT, Tercera edición, 137 p., Washington, EEUU (1980).
6. H. Grossi Gallegos, I. Nollmann, R. Lopardo y G. Atienza, Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. Actas de la 8va. Reunión de Trabajo de la ASADES Santa Rosa, La Pampa, Argentina, pp. 179-194 (1983).
7. J. Hay, Data processing, validation and quality control. In 'Revised Instruction Manual in Radiation Instruments and Measurements' (C. Froelich and J. London, eds.), WMO/TD-No. 149, WCRP Publication Series No. 7 (1986).
8. H. Grossi Gallegos, G. Atienza y M. García, Cartas de radiación solar global diaria para la región meridional de América del Sur. Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología, Buenos Aires, Argentina, pp. 16.3.1-16.3.10 (1987).
9. H. Grossi Gallegos and R. Lopardo, Variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Humeda. Solar Energy vol. 40 No. 5, pp. 397-404 (1988).
10. H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, G. Atienza, M. García y M. Peralta, Actualización de la evaluación de los datos de radiación solar global obtenidos por la Red Solarimétrica. Actas de la 10ma. Reunión de Trabajo de la ASADES, Neuquén, Argentina, pp. 177-185 (1985).
11. I. Bernett, Frequency of daily insolation in anglo North America during June and December. Solar Energy, vol. 11, pp. 41-55 (1967)
12. R. Skaggs, D. Baker and J. Ljungkull, The influence of persistence and variability on the required solar radiation record length. Solar Energy, vol. 28, pp. 281-287 (1982).