

## **VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA IRRADIACIÓN SOLAR EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES**

C. Raichijk

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,  
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,  
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** Se realiza un estudio comparativo de valores simultáneos de irradiación solar global obtenidos en tres estaciones ubicadas en el área metropolitana de Buenos Aires: Luján, San Miguel y Villa Martelli. Se cuenta con datos diarios para el período que va desde enero de 2007 hasta abril de 2010. El coeficiente de variabilidad espacial obtenido entre distintos pares de estaciones aumenta con la distancia entre las mismas, variando de 7.7% para una distancia mínima de 21.1 km a 9.9% con una distancia máxima de 50.5 km. En Villa Martelli se registran valores más altos en todos los meses, encontrándose variaciones diarias medias mensuales máximas de 10% en junio respecto a Luján y de 8.2% en febrero al compararlos con San Miguel. Si se comparan valores correspondientes a días de cielo claro, las variaciones diarias medias mensuales en términos absolutos son mayores siempre en invierno.

**Palabras clave:** irradiación solar global, variabilidad espacial, región metropolitana, Buenos Aires.

### **INTRODUCCIÓN**

Cuando se desea planificar o evaluar una red de estaciones meteorológicas o solarimétricas el estudio del comportamiento espacial del campo de valores suministrado por las mismas es determinante. Mediante la definición de la función estructura (Gandin, 1970) o el coeficiente de variabilidad espacial,  $C_V$ , (Hay y Suckling, 1979) en función de la distancia entre pares de estaciones de medición se puede tanto, analizar las condiciones de interpolación o extrapolación en una región dada del dato obtenido en cada estación, como estimar el error medio de medición del parámetro suministrado por la red. Siguiendo esta metodología Bischoff y de Lloret (1988) estimaron el error de observación asociado a una red de estaciones de medición de temperatura y presión atmosférica en superficie en Argentina, Grossi Gallegos y Lopardo (1988) y Grossi Gallegos y Atienza (1992) analizaron la variabilidad espacial de la irradiación solar global y la heliofanía relativa respectivamente en la Pampa Húmeda y Raichijk et al. (2006) realizaron el mismo estudio para la heliofanía efectiva en la región de clima Templado Húmedo del Cono Sur de América del Sur.

Por otro lado, en distintos trabajos se comparan datos simultáneos de irradiación solar obtenidos en estaciones ubicadas en ámbitos rurales y urbanos dentro de una misma región climática con el objeto de poder identificar el impacto que podría causar la presencia de aerosoles antropogénicos en la atenuación de la irradiación solar que llega a la superficie. Peterson y Stoffel (1980) analizan datos horarios de irradiación global obtenidos en seis estaciones de la región metropolitana de St. Louis, Missouri (EE. UU.), para días de cielo claro encuentran diferencias entre la irradiación urbana y rural de 4.5% en invierno y 2% en verano. Estas diferencias llegan al 21-22% en la ciudad de México tanto en la estación seca como en la lluviosa (Jáuregui y Luyando, 1999). Codato et al. (2008) comparan datos de irradiación global y difusa obtenidos en un área urbana de la ciudad de San Pablo, Brasil, con una zona rural del Estado de San Pablo representada por la estación de Botucatu. Para los distintos meses del año se observa en San Pablo siempre valores medios mensuales menores de irradiación global y mayores de la componente difusa, siendo estas diferencias atribuidas a la mayor polución atmosférica y a la presencia de aerosoles marinos, dada su proximidad a la costa atlántica.

En el presente trabajo se comparan datos simultáneos diarios de irradiación global en tres localidades con diferentes densidades de población ubicadas en el área metropolitana de Buenos Aires como son: Luján, San Miguel y Villa Martelli. Con tal fin se determina para cada par de estaciones el coeficiente de variabilidad espacial,  $C_V$ , y las variaciones diarias medias mensuales en los niveles de irradiación para los distintos meses del año.

### **MATERIALES Y MÉTODO**

Se emplearon datos diarios de irradiación global para el período que va desde enero de 2007 hasta abril de 2010 obtenidos en las siguientes localidades y estaciones de medición: Luján, Partido de Luján, estación de GERSolar de la Universidad Nacional de Luján; San Miguel, Partido Gral. Sarmiento, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y Villa Martelli, Partido Vicente López, estación Ceilap-BA. Los datos de la estación Ceilap-BA son los que se publican en <http://solrad-net.gsfc.nasa.gov/> (level 1.5). En Tabla 1 se consignan las ubicaciones geográficas de las estaciones consideradas, el sensor utilizado en cada una de ellas y la densidad poblacional al año 2001 de los correspondientes Partidos del Gran Buenos Aires.

Como se observa en la Tabla 1 las tres estaciones analizadas se encuentran prácticamente en la misma latitud, en zonas con un gradiente creciente de densidad poblacional desde Luján, en un área rural, hasta Villa Martelli ubicada en un ámbito urbano en el límite entre la Provincia y la ciudad de Buenos Aires.

estaciones	Latitud S [°]	Longitud W [°]	Sensor	Densidad Poblacional (hab./km <sup>2</sup> )
Luján	34.58	59.05	Cimel CE-180	117.5
San Miguel	34.55	58.73	K&Z CMP 11	3300
Villa Martelli	34.56	58.50	K&Z CMP 11	7300

Tabla 1: Datos de las estaciones de medición.

En la Tabla 2 se muestran las distancias en km entre los distintos pares de estaciones analizadas.

estaciones	Luján	San Miguel	Villa Martelli
Luján	-	29.5	50.5
San Miguel		-	21.1
Villa Martelli			-

Tabla 2: Distancias en kilómetros entre pares de estaciones.

Si se denomina con  $H(x,y)$  al dato diario de irradiación global en una localidad e indicamos el valor medio mensual con una barra sobre el símbolo, podemos notar la desviación con respecto al valor medio (anomalía) de la siguiente manera:

$$H'(x,y) = H(x,y) - \overline{H(x,y)} \quad (1)$$

En base a este formalismo se define la función estructura:

$$b_n(x_1, y_1, x_2, y_2) = \overline{[H'(x_1, y_1) - H'(x_2, y_2)]^2} \quad (2)$$

A partir de (2) y con el fin de independizarse de los valores absolutos de irradiación es conveniente utilizar la modificación introducida por Hay y Suckling (1979) en la definición del coeficiente de variabilidad espacial,  $C_v$ , entre dos estaciones:

$$C_v = \frac{b_n^{1/2}}{0.5(\overline{H_1} + \overline{H_2})} \times 100\% \quad (3)$$

donde los valores ubicados en el denominador indican los promedios mensuales de irradiación en las mismas localidades para las cuales se calcula la función estructura.

La variación diaria media mensual absoluta de los valores de irradiación global en una estación  $i$ ,  $H_i$ , respecto a los valores de irradiación global en otra estación  $j$ ,  $H_j$ , se calcula como:

$$\text{Var} = \overline{(H_i - H_j)^2} \quad (4)$$

y la variación diaria media mensual relativa como

$$\text{Var}^{\circ}\% = \frac{(\overline{H_i - H_j})}{\overline{H_j}} * 100\% \quad (5)$$

## RESULTADOS

En la Tabla 3 se consignan los valores obtenidos del coeficiente de variabilidad espacial,  $C_V$ , entre los distintos pares de estaciones consideradas.

estaciones	Luján	San Miguel	Villa Martelli
Luján	-	8.0	9.9
San Miguel		-	7.7
Villa Martelli			-

Tabla 3. Coeficiente de variabilidad espacial,  $C_V$  (%), entre pares de estaciones.

En la Tabla 4 se muestran las variaciones diarias medias mensuales absolutas, en  $\text{MJ/m}^2$ , y relativas entre pares de estaciones para los distintos meses del año. Considerando que el error de medición para el tipo de sensores utilizados es igual a 5%, se consignan en negrita los valores que representan una variación superior al error de medición y en cursiva los que no superan este nivel. Se calculó, a su vez, las variaciones diarias medias mensuales considerando sólo los días de cielo claro. Se tomó como día de cielo claro aquel cuyo índice de claridad,  $k_t$ , (cociente entre la irradiación sobre superficie e irradiación a tope de atmósfera) fuera mayor o igual a 0.7. Debido a que los casos simultáneos de cielo claro entre pares de estaciones son mucho menores, se determinaron la variaciones diarias medias para las distintas estaciones del año: verano, meses de enero, febrero, noviembre y diciembre; invierno, mayo, junio, julio y agosto y primavera-otoño, marzo, abril, septiembre y octubre. En la Tabla 5 se consignan los resultados obtenidos junto al número de días considerado por cada par de estaciones.

meses	San Miguel-Luján		Villa Martelli-Luján		Villa Martelli-San Miguel	
	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%
enero	-1.2	-4.8	0.5	2.0	<b>1.2</b>	5.0
febrero	<b>-1.0</b>	-5.4	0.5	2.6	<b>1.5</b>	8.2
marzo	-0.5	-2.7	0.7	3.9	<b>1.4</b>	8.7
abril	-0.4	-2.6	<b>0.7</b>	5.4	<b>1.1</b>	8.6
mayo	0.1	0.5	<b>0.7</b>	7.4	<b>0.7</b>	6.9
junio	0.1	1.6	<b>0.8</b>	10.0	<b>0.7</b>	8.1
julio	0.1	0.6	<b>0.6</b>	7.8	<b>0.6</b>	6.8
agosto	-0.1	-0.5	0.4	3.2	0.4	3.9
septiembre	-0.5	-3.2	0.2	1.1	<b>0.7</b>	5.2
octubre	-0.3	-1.4	0.2	1.0	0.3	1.6
noviembre	-0.1	-0.3	0.6	2.6	0.7	3.0
diciembre	<b>-1.5</b>	-5.8	0.0	0.0	<b>1.2</b>	5.0

Tabla 4: Variaciones diarias medias mensuales absolutas ( $\text{MJ/m}^2$ ) y relativas entre pares de estaciones para los distintos meses del año.

estaciones del año	San Miguel-Luján			Villa Martelli-Luján			Villa Martelli-San Miguel		
	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%	n° de días	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%	n° de días	Var ( $\text{MJ/m}^2$ )	Var%	n° de días
verano	0.0	0.1	42	0.3	1.0	88	0.4	1.4	42
invierno	0.2	1.2	5	<b>0.7</b>	5.0	9	<b>0.7</b>	5.1	17
primavera-otoño	-0.0	-0.2	31	0.6	2.8	31	0.6	2.6	26

Tabla 5: Variaciones diarias medias mensuales absolutas ( $\text{MJ/m}^2$ ) y relativas para días de cielo claro entre pares de estaciones para verano, invierno y primavera-otoño.

Por último en la Figura 1 se muestra la evolución de los valores diarios medios mensuales de irradiación global de las distintas estaciones en el período analizado. Se consignan valores medios para aquellos meses con un máximo faltante de tres días.

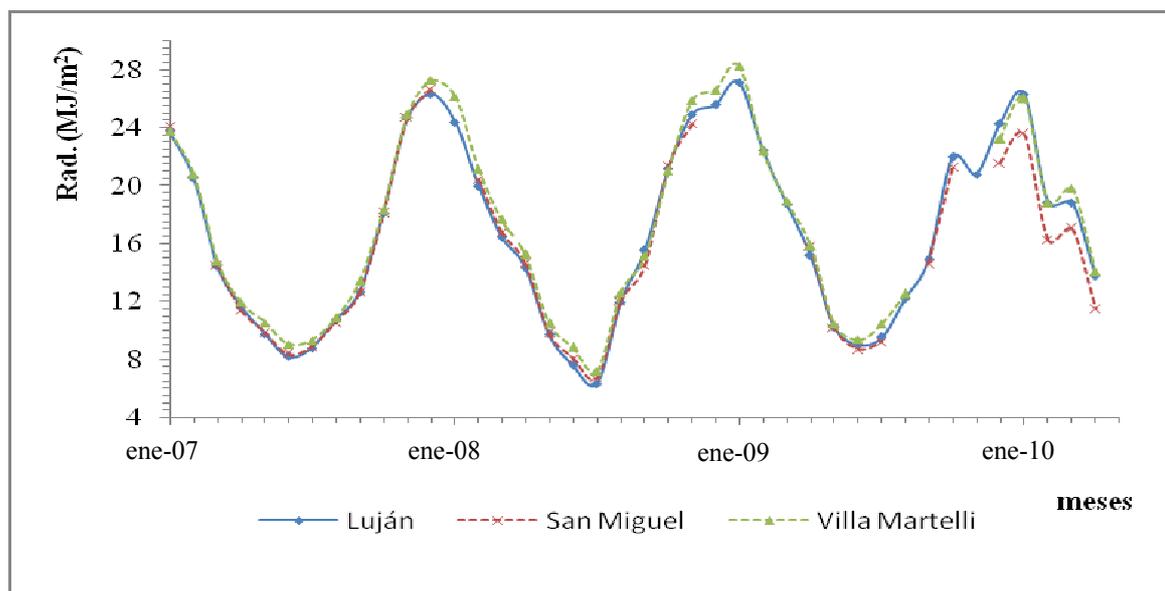


Figura 1. Evolución de las medias mensuales de irradiación global ( $\text{MJ/m}^2$ ) en las distintas estaciones para el período enero2007- abril 2010.

## CONCLUSIONES

Se estudió la variabilidad espacial de la irradiación global en el área metropolitana de Buenos Aires. Para el período enero 2007 – abril 2010 se observa que el coeficiente de variabilidad espacial,  $C_v$ , aumenta con la distancia entre estaciones. Varía de 7.7% entre San Miguel y Villa Martelli, separados por una distancia de 21.1 km, hasta 9.9% entre Luján y Villa Martelli ubicados a 50.5 km de distancia. Estos valores superan el error de medición, que para el tipo de sensores utilizados puede considerarse igual a 5%. Al calcular las variaciones diarias medias mensuales se encuentra lo siguiente:

- Los valores de San Miguel presentan respecto a Luján variaciones relativas superiores al 5% sólo en los meses de febrero y diciembre, siendo en términos absolutos iguales a  $-1.0 \text{ MJ/m}^2$  y  $-1.5 \text{ MJ/m}^2$  respectivamente.
- En Villa Martelli se registran valores más altos en todos los meses, tanto respecto a Luján como a San Miguel. La variación máxima con Luján es de  $0.8 \text{ MJ/m}^2$  en junio, igual a 10%. Con respecto a San Miguel la máxima variación es de  $1.5 \text{ MJ/m}^2$  en febrero, lo que representa una diferencia del 8.2%.
- Cuando se comparan datos de días de cielo claro, se observan variaciones relativas mayores al 5% sólo en invierno entre Villa Martelli y Luján (5%) y Villa Martelli y San Miguel (5.1%), siendo de  $0.7 \text{ MJ/m}^2$  en ambos casos.

Los valores diarios medios mensuales en el período estudiado siguen una misma evolución con diferencias máximas de  $-2.2 \text{ MJ/m}^2$  (-16.1%) en abril 2010 entre San Miguel y Luján,  $1.2 \text{ MJ/m}^2$  (16.3%) en junio 2008 entre Villa Martelli y Luján y  $2.5 \text{ MJ/m}^2$  (21.7%) en abril 2010 entre Villa Martelli y San Miguel.

El objetivo de este trabajo fue comparar datos diarios simultáneos de irradiación global, tal como son suministrados por las diferentes estaciones de medición. Para poder avanzar en el análisis de las variaciones obtenidas en los valores diarios de irradiación global entre las distintas estaciones se deberá contar con datos locales de cobertura nubosa, agua precipitable y contenido de aerosoles que permitan evaluar, para localidades que se encuentran a una misma latitud y altura, los distintos factores de atenuación de la irradiación incidente. Siendo necesario previamente compatibilizar y aunar criterios de control de calidad y depuración de las respectivas bases de datos.

## REFERENCIAS

- Bischoff S. A. y de Lloret M. L. (1988) Estimación de errores de observación de variables meteorológicas. Meteorológica 16, n° 1 y 2, 1-9.
- Codato G., Oliveira A. P., Soares J., Escobedo J. F., Gomes E. N., Pai A. D. (2008) Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. Theor. Appl. Climatol 93, 57–73.
- Gandin L. S. (1970) The planning of meteorological station networks. Tech. Note No. 111, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO-No. 265.TP.149, 135 p.
- Grossi Gallegos, H. and Lopardo R. (1988) Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Húmeda. Solar Energy 40, 5, 397-404.

- Grossi Gallegos H. y Atienza G. (1992) Análisis del comportamiento espacial de los datos de radiación solar en la Pampa Húmeda. En Memoria del IV Congreso Interamericano y I Iberoamericano de Meteorología, Cáceres y Salamanca, España, 216-220.
- Hay J. E. and Suckling Ph. (1979) An assessment of the networks for measuring and modelling solar radiation in British Columbia and adjacent areas of Western Canada. *Canad. Geographer* XXIII(3), 223-237.
- Jáuregui E. and Luyando E. (1999) Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *Int. J. Climatol.* 19, 683-694.
- Peterson J. T. and Stoffel T. L. (1980) Analysis of urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri. *J. Appl. Meteor.* 19, 275-283.
- Raichijk, C.; Grossi Gallegos, H.; Righini, R. (2006) Variabilidad espacial de la heliofanía (duración de la insolación) en la Pampa Húmeda argentina, Uruguay y sur del Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 19, 33-37.

**ABSTRACT:** In this work is carried out a comparative study of simultaneous values of global solar irradiation from three stations located in the metropolitan area of Buenos Aires: Luján, San Miguel and Villa Martelli. One counts for it with daily data for the period from January 2007 until April 2010. The coefficient of spatial variability found between different pairs of stations increases with the distance between them, from 7.7% to a minimum distance of 21.1 km to 9.9% with a maximum distance of 50.5 km. In Villa Martelli are recorded highest values in every month, found monthly mean daily maximum variations of 10% in June about Luján and 8.2% in February compared with San Miguel. When comparing values for clear sky days, the monthly mean daily variations are, in absolute terms, always higher in winter.

**Key words:** solar radiation, spatial variability, metropolitan region, Buenos Aires.