

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE HELIOFANÍA EN LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos, R. Righini

GERSolar, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@mail.unlu.edu.ar

RESUMEN: Dada la escasa cobertura de las estaciones de medición de la irradiación solar, tanto espacial cuanto temporal, fueron apareciendo alternativas para estimarla a partir de correlaciones con datos obtenidos en tierra o por sensores remotos. Así, las correlaciones establecidas entre la irradiación global y la heliofanía podrían ser recomendadas para la evaluación del recurso solar en Sudamérica. Continuando lo hecho en Argentina comenzamos en este trabajo a evaluar la cobertura provista por la red de estaciones del Uruguay que miden la heliofanía. Para ello, analizamos la variación de la función estructura relativa con la distancia entre pares de estaciones para las diferentes estaciones del año. Pudimos observar la homogeneidad del país y su adecuada cobertura, estimando el error del sistema.

Palabras clave: heliofanía, comportamiento espacial, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años se ha dedicado bastante trabajo al rescate de datos de heliofanía (también denominada horas de brillo solar o insolación) por ser uno de los parámetros más ligados a la irradiación solar que posee registros históricos de gran extensión y distribuidos con vastedad por todo el mundo. En Argentina se ha comenzado su análisis detallado ya que su interés reside no sólo en la posibilidad de estimar los promedios de irradiación global a partir de correlaciones estadísticamente establecidas (Grossi Gallegos *et al.*, 2003; Righini y Grossi Gallegos, 2003) sino también la de analizar a través de ella la posible influencia del Cambio Climático Global (CCG) sobre el régimen solar.

Por otra parte, uno de los objetivos planteados inicialmente en la Red Iberoamericana de Solarimetría -RISOL del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED, 2000) fue la recolección de datos solares existentes en la región para evaluarlos y compatibilizarlos para así tratar de llegar a un conjunto de cartas que describieran el comportamiento espacial y temporal de los promedios de la irradiación solar global. Finalizada la existencia de esta Red Temática se pudo verificar que eran realmente escasas las series de valores de irradiación global medidas y que su precisión era variada e incierta, mientras que los valores de heliofanía que se disponían constituían realmente una base importante y podrían permitir su evaluación y, de allí, estimar la distribución del recurso solar a través de alguna correlación conveniente.

Como paso previo a la integración de la información procedente de diferentes países se hace necesario evaluar el comportamiento temporal y espacial del parámetro en cada uno de ellos, sus condiciones de extrapolación (analizando la homogeneidad de las regiones y la cobertura brindada por el conjunto de estaciones) y la incerteza de los instrumentos utilizados, pues no todas las instituciones dedicadas a la medición de la heliofanía utilizan las mismas fajas.

Teniendo como objetivo comenzar este proceso de integración en América del Sur, la primera etapa a cubrir es la zona ubicada al Este de los Andes y del Altiplano, comenzando con Argentina, Uruguay, Brasil y Paraguay para poner a punto una metodología de trabajo. Existe algún antecedente de análisis del comportamiento espacial de la heliofanía en la Pampa Húmeda (Grossi Gallegos y Atienza, 1992) como así también de las series temporales a nivel nacional (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2004, 2006). En este trabajo comenzamos a analizar el comportamiento espacial del parámetro en la República Oriental del Uruguay.

MATERIALES Y MÉTODO

En virtud del Convenio de Cooperación que vincula a la Universidad Nacional de Luján con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se tuvo acceso a los datos de insolación total mensual facilitados por la División Climatología Aplicada de la Dirección Nacional de Meteorología de la República Oriental del Uruguay adquiridos entre 1986 y 2005 en 11 de sus estaciones (ver Figura 1 y Tabla 1). Los mismos fueron procesados, calculándose los promedios mensuales de heliofanía efectiva diaria.

La forma habitual de analizar las condiciones de extrapolación de variables meteorológicas es la propuesta por Gandin (1970) a través de la función estructura, metodología ya aplicada en varios países (ver, por ejemplo, Suckling y Hay, 1976) y en Argentina para analizar los datos de irradiación solar global (Grossi Gallegos y Lopardo, 1988) y de heliofanía relativa (Grossi Gallegos y Atienza, 1992) en la Pampa Húmeda, suponiendo que la misma es una región homogénea y que ambos parámetros varían de manera isotrópica.

| Nombre | Latitud S [°] | Longitud W [°] | Altura [m.s.n.m.] |
|-------------------|---------------|----------------|-------------------|
| Artigas | 30.4 | 56.51 | 120.88 |
| Carrasco | 34.83 | 56.00 | 32.88 |
| Colonia | 34.46 | 57.84 | 22.84 |
| Mercedes | 33.25 | 58.07 | 17.01 |
| Melo | 32.37 | 54.19 | 100.36 |
| Paso de los Toros | 32.80 | 56.53 | 75.48 |
| Paysandú | 32.35 | 58.03 | 61.12 |
| Rivera | 30.90 | 55.54 | 241.94 |
| Rocha | 34.49 | 54.31 | 18.16 |
| Salto | 31.43 | 57.98 | 44.00 |
| Treinta y Tres | 33.22 | 54.39 | 46.4 |

Tabla 1. Estaciones uruguayas de medición de las horas de insolación (heliofanía).

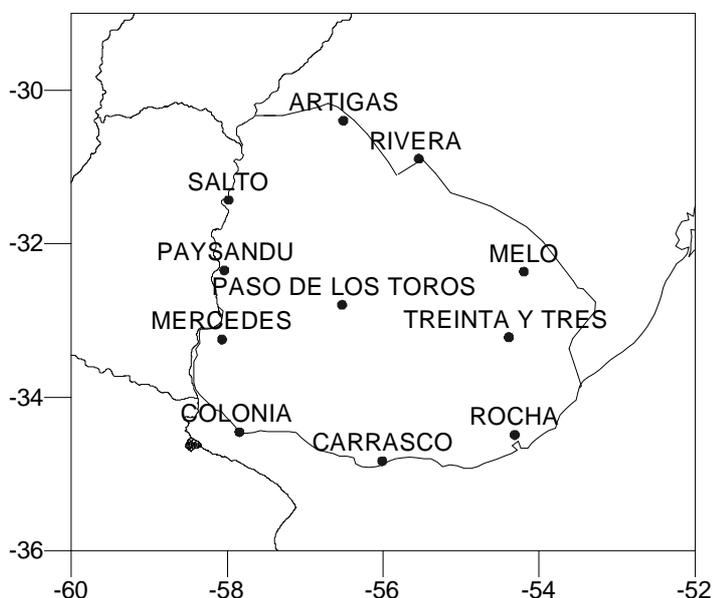


Figura 1. Ubicación de las estaciones consideradas.

Para el caso que nos ocupa, si denominamos con $n(x,y)$ a las horas de insolación o heliofanía efectiva medidas en una localidad e indicamos su valor medio con una barra sobre el símbolo, podemos notar la desviación con respecto al valor medio (anomalía) de la siguiente manera:

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

En base a este formalismo podríamos definir la función estructura de la siguiente manera:

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

Es más conveniente estudiar esta función estructura de las anomalías que la calculada directamente en base a los valores de heliofanía ya que su variación latitudinal será en general diferente de la longitudinal (no será homogénea).

También debe tenerse en cuenta que la incerteza en la medición introduce un error sistemático en el valor de esta función, suma de los errores cometidos en cada una de las estaciones, que debe adicionarse a la función estructura; la suposición más simple es que dichos errores en diferentes lugares no están correlacionados entre sí o con los valores medidos, ni que

dependen de las coordenadas; como mostró Gandin en el trabajo citado, esto nos permitiría estimar la incerteza introducida en la medición si extrapolamos la función estructura a distancia cero a partir de la expresión:

$$b_n(0,0,0,0)=2\sigma_n^2 \quad (3)$$

donde σ_n es el error de observación.

Con el fin de independizarnos de los valores absolutos de heliofanía nos pareció conveniente utilizar la modificación introducida por Hay y Suckling (1979) en la definición del coeficiente de variabilidad de Pearson:

$$c_v = \frac{b_n^{1/2}}{0.5(n_1 + n_2)} \times 100\% \quad (4)$$

donde los valores ubicados en el denominador indican los promedios de la heliofanía en las mismas localidades para las cuales se calcula la función estructura. Analizaremos entonces la variación de este coeficiente con la distancia entre estaciones (Tabla 2), agrupando primero los datos estacionalmente (equinoccios y solsticios) y luego para todo el año.

| Estación | n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------|----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Artigas | 1 | - | 495.9 | 468.8 | 350.0 | 310.7 | 267.4 | 261.1 | 107.9 | 500.4 | 181.9 | 372.9 |
| Carrasco | 2 | | - | 172.9 | 258.9 | 322.0 | 231.3 | 334.3 | 440.4 | 160.2 | 420.7 | 233.7 |
| Colonia | 3 | | | - | 135.9 | 411.1 | 221.1 | 235.4 | 451.1 | 324.1 | 336.8 | 347.7 |
| Mercedes | 4 | | | | - | 375.6 | 152.4 | 100.4 | 354.0 | 373.7 | 202.4 | 342.6 |
| Melo | 5 | | | | | - | 224.1 | 361.4 | 207.9 | 236.8 | 373.0 | 96.7 |
| Paso de los Toros | 6 | | | | | | - | 150.3 | 231.4 | 278.7 | 204.9 | 205.0 |
| Paysandú | 7 | | | | | | | - | 286.3 | 420.4 | 102.0 | 355.0 |
| Rivera | 8 | | | | | | | | - | 416.7 | 240.0 | 280.8 |
| Rocha | 9 | | | | | | | | | - | 483.3 | 141.7 |
| Salto | 10 | | | | | | | | | | - | 392.4 |
| Treinta y Tres | 11 | | | | | | | | | | | - |

Tabla 2. Distancias en kilómetros entre pares de estaciones de la Red

RESULTADOS

Tomando como referencia los valores promedio estacionales (noviembre, diciembre, enero y febrero; marzo, abril, septiembre y octubre; mayo, junio, julio y agosto) para cada par de estaciones del conjunto, calculamos el coeficiente de variabilidad en función de la distancia entre ellas para todo el año (Figura 2) y para cada uno de los periodos. A fin de resaltar la importancia del carácter de “anomalía” de la variable estudiada, aún en el estudio anual mantuvimos como referencia los promedios estacionales de manera de independizarnos de la variación propia del parámetro a lo largo del año. Dado que no existen estaciones que disten a menos de 96 km no nos fue posible detectar la posible convergencia para pequeñas distancias, como se observa en algunos de los otros trabajos ya citados. Por lo tanto, utilizamos una aproximación lineal para describir las distribuciones de puntos correspondientes, las que se muestran en la Figura 3.

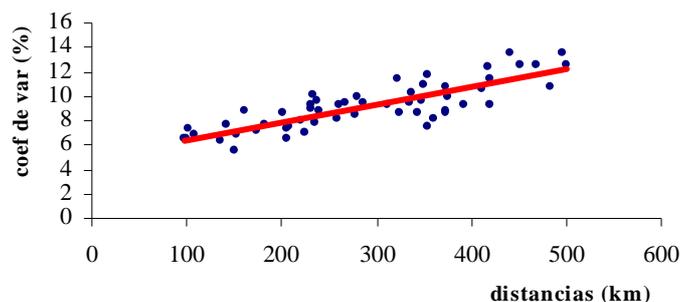


Figura 2. Variación anual del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km).

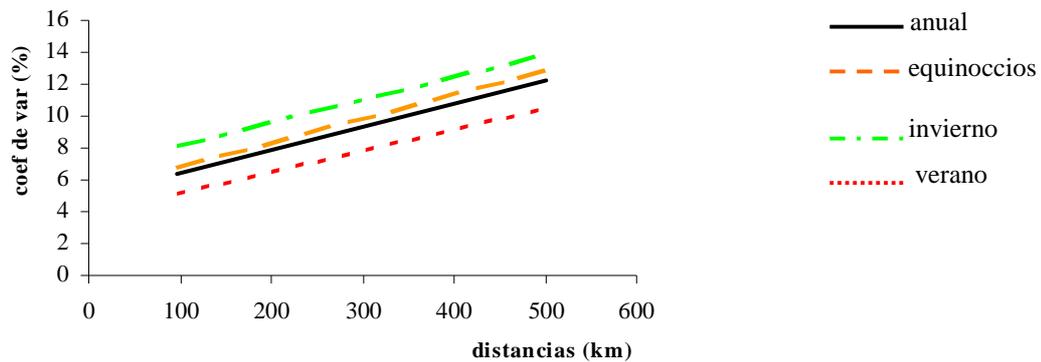


Figura 3. Aproximaciones lineales para la variación anual y estacional del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km).

| Período | Pendiente | Ordenada al origen |
|-------------|---------------------|--------------------|
| Invierno | 0.0143 ± 0.0016 | 6.76 ± 0.48 |
| Anual | 0.0143 ± 0.0013 | 5.03 ± 0.41 |
| Equinoccios | 0.0151 ± 0.0016 | 5.30 ± 0.50 |
| Verano | 0.0133 ± 0.0015 | 3.82 ± 0.47 |

Tabla 3. Pendiente y ordenada al origen de las aproximaciones lineales para la variación anual y estacional del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km).

De manera similar a lo obtenido con los valores de irradiación solar global en los trabajos ya mencionados, el coeficiente de variabilidad para la heliofanía resultó mayor en invierno que en verano. La proximidad y similitud de las distribuciones estacionales no justifica su diferenciación, (ver Tabla 3), razón por la cual analizamos en detalle la que describe el comportamiento anual (prácticamente coincidente con la de primavera + otoño). En este caso, la expresión resultante es:

$$c_v [\%] = 0.0143 D + 5.03 \quad (5)$$

donde D es la distancia entre estaciones, medida en kilómetros.

El uso de la función estructura en la fórmula (4), que juega el rol de un desvío estándar, implica sólo un nivel de confianza del 67%. Niveles más altos de confianza pueden alcanzarse multiplicando los coeficientes obtenidos por el valor de Z apropiado, tal como 1.644 para el 90% (Z es denominada *variable Normal tipificada*, según García, 2004). Suckling (1983) observó que, aunque los valores de las anomalías no estén normalmente distribuidos, la aproximación utilizada en la definición del coeficiente de variabilidad se comporta como tal cuando se la convierte al nivel de confianza del 90%. Si se procede de la manera indicada, la expresión lineal hallada se convierte en:

$$c_v [\%] = 0.0235 D + 8.275 \quad (6)$$

A partir de (3) si tomamos el valor de esta expresión a distancia $D=0$ y lo dividimos por raíz cuadrada de dos ($2^{0.5}$) vemos que los promedios mensuales de heliofanía obtenidos en las estaciones uruguayas son estimados con un error de 5.85%. Si buscamos un intervalo de confianza de 95% y multiplicamos por 1.96, se podría afirmar que los promedios mensuales se estiman con una incerteza de 7%.

CONCLUSIONES

Multiplicando los valores del coeficiente de variabilidad de la figura por 1.644 se podría afirmar que, con un nivel de confianza del 90%, es posible extrapolar los valores obtenidos en las estaciones de medición de la insolación en Uruguay hasta distancias de 285 km sin exceder un error del 15%, y hasta 183 km si lo que pedimos es un nivel de confianza del

95% (con este nivel de confianza podríamos hacerlo hasta 73 km sin exceder un error de extrapolación del 10%), lo cual nos está indicando la marcada homogeneidad de su territorio y la adecuada cobertura brindada por su red de estaciones.

Por otra parte, también resulta importante (y de mucha utilidad para el análisis de la estabilidad de las series temporales) la estimación de la incerteza cometida en la determinación de los promedios mensuales de heliofanía obtenida directamente a partir del estudio de su comportamiento espacial ya que generalmente (ver, por ejemplo, los trabajos canadienses) se trabaja con valores diarios y luego, suponiendo la validez del Teorema Central del Límite, se afecta los resultados del coeficiente de variabilidad multiplicándolos por 0.183 (esto es, $1/30^{0.5}$).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean formular su agradecimiento a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional, por haber tramitado y facilitado, una vez obtenida, la información utilizada, y a las de la Dirección Nacional de Meteorología de la República Oriental del Uruguay, sin cuyo aporte no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- 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.
- García R. M. (2004) Inferencia estadística y diseño de experimentos. EUDEBA, 1ra. Edición, Buenos Aires, 736 p.
- Grossi Gallegos H. y Lopardo R. (1988) Variabilidad espacial de los valores de la radiación solar global obtenidos por la Red Solarimétrica en la Pampa Húmeda. En *Actas de la 10ma. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar*, Neuquén, Neuquén, pp. 167-176.
- 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, pp. 216-220
- Grossi Gallegos H., Roberti A., Renzini G. y Sierra V. (2003) Algunos comentarios sobre el modelo de Suehrcke y su aplicación en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7(2)*, 11.01-11.05 versión CD-ROM.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2004) Análisis de los datos de heliofanía en el sur de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6 (2)*, 11.19-11.24 versión CD-ROM.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2006) Análisis de las series de datos de heliofanía en estaciones de Argentina ubicadas al norte de los 38°S. Enviado para su publicación en *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9*, versión CD-ROM.
- 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.
- 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 7(2)*: 11.07-11.11 versión CD-ROM.
- Secretaría General del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo – CYTED (2000) *Memoria 1998-99*, 211 p., Madrid, España.
- Suckling Ph. and Hay J. E. (1976) The spatial variability of daily values of solar radiation for British Columbia and Alberta, Canada. *Climatological Bulletin*, No. 20, pp. 1-7, McGill University.
- Suckling Ph. W. (1983) Extrapolation of Solar Radiation Measurements: Meso-scale Analyses from Arizona and Tennessee Valley Authority Regions. *J.Clim. and Appl. Meteor.* **22**, 488-494.

ABSTRACT: Given the scarcity of solar irradiation measured data that were accurate enough and that could comply with the statistical conditions as to be considered representative in time and space, there gradually appeared alternatives in the world to estimate them using the information measured on land or collected from remote sensing data. So, the correlations between sunshine hours and global solar irradiation can be recommended for the evaluation of available energy in South American countries. After Argentina, we begin in this work to assess the coverage provided by the existing sunshine hours monitoring network for Uruguay. For that purpose, we analyze the variation of relative structure function in terms of the distance between pairs of stations for different seasons of the year. We could observe the homogeneity of the country and the adequate coverage, estimating the error of the system.

Key words: sunshine hours, spatial behavior, Uruguay.