

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HELIOFANÍA (DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN) EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA, URUGUAY Y SUR DEL BRASIL

C. Raichijk, H. Grossi Gallegos y R. Righini – gersolar@yahoo.com.ar
Universidad Nacional de Luján, Grupo de Estudios de la Radiación Solar
Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA

1.2 Potencial Solar e Eólico

Resumen. *La cobertura espacial de las redes de medición de tierra no pueden satisfacer todas las necesidades de los usuarios porque en muchas regiones del mundo – sino en todas – la densidad de las mismas es baja; y esto es más marcado en el caso de la radiación solar. La insuficiencia de datos de irradiación global con condiciones estadísticas de representatividad temporal y espacial es el motivo para usar la heliofanía a fin de estimarlos a través de diferentes correlaciones que han probado su buen ajuste con las mediciones. Para intentar trazar cartas con la distribución espacial de los promedios mensuales de la heliofanía (y, a partir de ellas, de irradiación solar global) en un territorio tan extenso como América del Sur es necesario estudiar la relación error-distancia entre estaciones en zonas homogéneas. Para ello, lo habitual es analizar el comportamiento espacial de algunos estadísticos de los campos aleatorios, como por ejemplo, la función estructura. En este trabajo, como primer paso para integrar la región plana sudamericana, se utilizaron datos de promedios mensuales de heliofanía correspondientes a la Pampa Húmeda de Argentina, del Uruguay y del sur del Brasil (englobadas en una misma región, según la clasificación climática de Koeppen) y se analizó su variación con la distancia entre estaciones. Se presentan algunos gráficos obtenidos para diferentes épocas del año y se analizan las similitudes y diferencias a fin de determinar las condiciones de extrapolación espacial de la información.*

Palabras clave: *Heliofanía, Variabilidad Espacial, Región Climática Cfa.*

1. INTRODUCCIÓN

La cobertura espacial de las redes de medición de tierra no pueden satisfacer todas las necesidades de los usuarios porque en muchas regiones del mundo – sino en todas – la densidad de las mismas es baja; y esto es más marcado en el caso de la radiación solar. La insuficiencia de datos de irradiación global con condiciones estadísticas de representatividad temporal y espacial es el motivo para usar la heliofanía a fin de estimarlos a través de diferentes correlaciones que han probado su buen ajuste con las mediciones.

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.

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.

Como paso previo a la integración de la información procedente de diferentes países en un territorio tan extenso como América del Sur 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.

En este trabajo se da comienzo al análisis de la relación error-distancia entre estaciones en zonas homogéneas, teniendo en cuenta como antecedente el estudio del comportamiento espacial de la heliofanía en la Pampa Húmeda (Grossi Gallegos y Atienza, 1992). La región elegida, de acuerdo con la clasificación climática de Koeppen (o de Koeppen-Geiger), abarca la Pampa Húmeda de Argentina, el Uruguay y el sur del Brasil; se caracteriza por presentar un clima templado, con precipitación suficiente en todos los meses y temperatura media del mes más caluroso superior a 22°C, lo que suele resumirse como región Cfa. En la Fig. 1 se presenta la ubicación de las estaciones utilizadas.

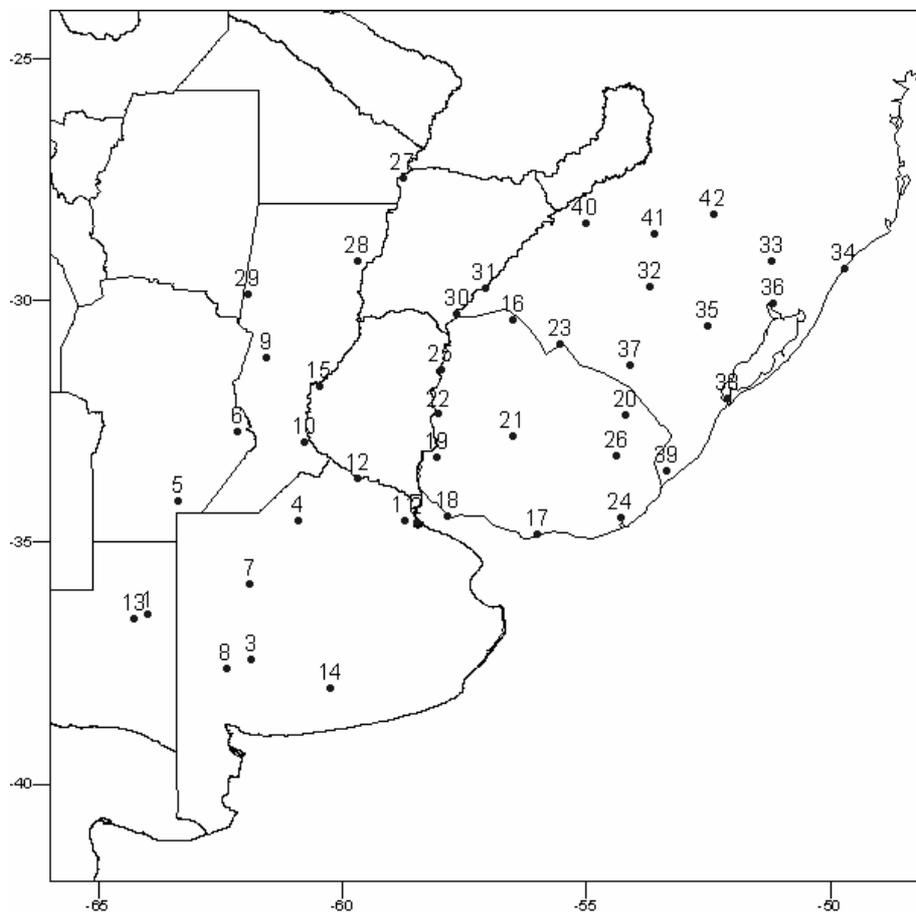


Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones consideradas.

2. MATERIALES Y METODOLOGIA

Se analizaron 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, los de heliofanía efectiva argentinos

facilitados por su Servicio Meteorológico Nacional (SMN), adquiridos en 15 estaciones entre 1956 y 2005, y los del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), tomados en 4 estaciones en el período que va de 1960 a 2000. Finalmente, se completó la base de análisis con los valores proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET) del Brasil, de donde se consideraron 12 estaciones, con los datos existentes entre 1960 y 2004, utilizándose en consecuencia un total de 42 estaciones.

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 and Hay, 1976) y en Argentina para analizar los datos de irradiación solar global (Grossi Gallegos y Lopardo, 1985) 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.

Si se denomina con $n(x,y)$ a las horas de insolación o heliofanía efectiva medidas en una localidad caracterizada por sus coordenadas espaciales (x,y) y se indica su valor medio con una barra sobre el símbolo, se puede 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:

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

en donde los subíndices indican el par de estaciones considerado.

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 ya citado, esto permitiría estimar la incerteza introducida en la medición si se extrapola 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 tener independencia de los valores absolutos de heliofanía pareció conveniente utilizar la modificación introducida por Hay y Suckling (1979) en la definición del coeficiente de variabilidad de Pearson, C_v :

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

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.

Inicialmente se agruparon los datos estacionalmente por solsticios y equinoccios, pero no fue posible diferenciar los valores de las curvas halladas debido a que los errores de los parámetros de las curvas provocaban su superposición, por lo que se analizó la variación del coeficiente de

variabilidad con la distancia entre estaciones para todo el año. Pero a fin de resaltar la importancia del carácter de “anomalía” de la variable estudiada, aún en el estudio anual se mantuvieron como referencia los promedios estacionales (de manera de independizarse de la variación propia del parámetro a lo largo del año), comenzando el análisis por Argentina y agregando gradualmente Uruguay y Brasil.

3. RESULTADOS

Se calcularon en primer lugar los promedios anuales para los años que tenían completos los registros mensuales, con lo cual la muestra se redujo, y se analizaron las series históricas restantes. Se eliminaron además todos aquellos valores promedio que se apartaban de la media general en más de $\pm 1.96\sigma$, esto es, un nivel de confianza del 95%.

Tabla 2. Listado de estaciones de la Pampa Húmeda argentina (los números se corresponden con las de la figura 1)

Estación	Nº	Lat [°]	Long [°]
Anguil INTA	1	-36.50	-63.98
Buenos Aires	2	-34.58	-58.48
Coronel Suarez Aero	3	-37.43	-61.88
Junin Aero	4	-34.55	-60.92
Laboulaye Aero	5	-34.13	-63.37
Marcos Juarez Aero	6	-32.70	-62.15
Pehuajó Aero	7	-35.87	-61.90
Pigüé Aero	8	-37.60	-62.38
Rafaela INTA	9	-31.18	-61.55
Rosario Aero	10	-32.92	-60.78
San Miguel	11	-34.55	-58.73
San Pedro INTA	12	-33.68	-59.68
Santa Rosa Aero	13	-36.57	-64.27
Tres Arroyos	14	-38.00	-60.25

Para las estaciones ubicadas en la Pampa Húmeda, que se listan en la Tab. 2 (los signos negativos indican Latitud Sur y Longitud Oeste, respectivamente), la relación hallada entre el coeficiente de variabilidad y la distancia entre estaciones se presenta en la Fig. 2 y puede ser aproximada por la siguiente expresión lineal con un coeficiente de correlación $r = 0.89$:

$$C_v = 0.0099D + 6.0569 \quad (5)$$

donde D es la distancia entre pares de estaciones medida en kilómetros. El buen ajuste obtenido está indicando que el supuesto de homogeneidad de la región es correcto. Cabe mencionar que debió ser dejada de lado la estación Ezeiza (sita en el Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini) debido a su ubicación en una zona particular muy baja y de frecuente ocurrencia de bancos de niebla.

El uso de la función estructura en la Eq. (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 la denominada *variable Normal estandarizada o tipificada*). 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%.

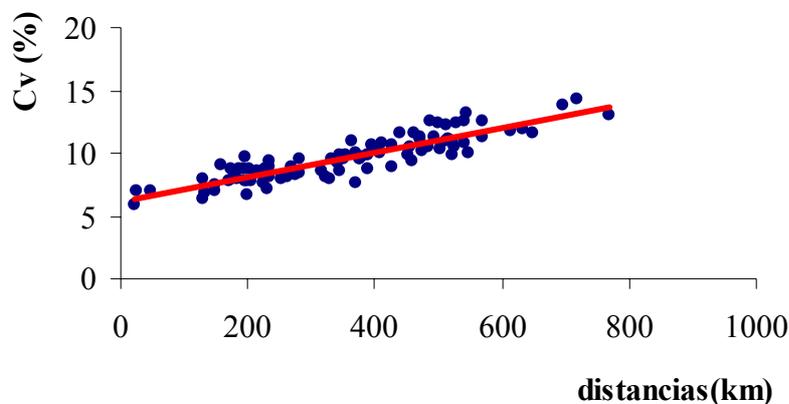


Figura 2. Variación anual del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km) en la Pampa Húmeda argentina.

Si se procede de la manera indicada, la expresión lineal hallada se convierte en:

$$C_v = 0.0163D + 9.957 \quad (6)$$

A partir de la Eq. (3) si se toma el valor de esta expresión a distancia $D=0$ y se lo divide por raíz cuadrada de dos ($2^{0.5}$) se encuentra que los promedios mensuales de heliofanía obtenidos en las estaciones argentinas están estimados con un error de 7.04%.

Figura 3. Estaciones uruguayas agregadas al conjunto anterior (incluye Paraná, de Argentina).

Estación	Nº	Lat [°]	Long [°]
Paraná INTA	15	-31.78	-60.48
Artigas	16	-30.40	-56.51
Carrasco	17	-34.83	-56.01
Colonia	18	-34.46	-57.84
Mercedes	19	-33.25	-58.07
Melo	20	-32.37	-54.19
Paso de los Toros	21	-32.80	-56.53
Paysandú	22	-32.35	-58.04
Rivera	23	-30.90	-55.54
Rocha	24	-34.49	-54.31
Salto	25	-31.43	-57.98
Treinta y Tres	26	-33.22	-54.39

El segundo paso dado fue incorporar una más, ubicada en la provincia mesopotámica argentina de Entre Ríos, y las estaciones uruguayas que se listan en la Tab. 3, lo que da un total de 26 estaciones.

Procediendo de manera similar a lo ya presentado, se obtuvo una correlación entre el coeficiente de variabilidad y la distancia entre estaciones, siendo descrita por la función polinómica levemente cuadrática que sigue, con un coeficiente de correlación $r=0.80$:

$$C_v = -2.10^{-6} D^2 + 0.0093D + 6.3565 \quad (7)$$

la que se representa, junto con los valores calculados, en la Fig. 3.

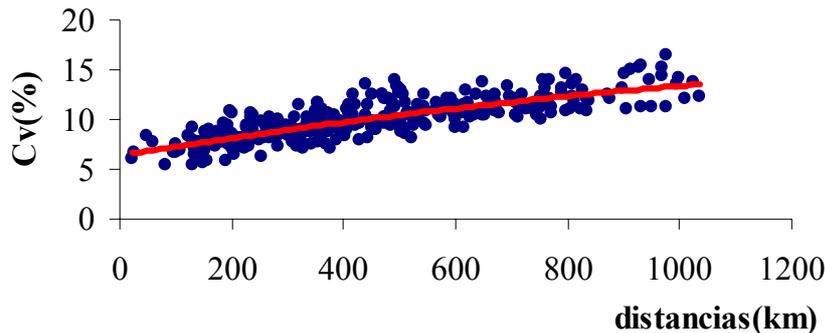


Figura 3. Variación anual del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km) en la Pampa Húmeda argentina y Uruguay.

Tratando los coeficientes de la misma manera anterior, se podría decir que el error de estimación de los promedios mensuales de esta región considerada es del orden de 7.4%. Cabe acotar que un estudio similar efectuado sólo sobre las estaciones uruguayas dio un error de estimación de 5.85% (Raichijk *et al.*, 2006), lo que pone en evidencia que las estaciones de medición de la Argentina utilizan fajas con diferente sensibilidad que las del Uruguay (que son provistas por el INMET).

Por último, se agregan al conjunto considerado 4 estaciones argentinas ubicadas en el límite norte de la región climática en estudio y 12 del sur del Brasil, lo que hace un total de 42 estaciones (se analizaron todas las estaciones del Estado de Rio Grande do Sul menos Iraí debido a que presenta promedios de precipitación mayores al resto de la región y Bom Jesús por encontrarse a más de 1000 metros de altura). En la Tab. 4 se listan las estaciones agregadas en este tercer paso.

Procediendo de manera similar, se calculó el comportamiento anual del coeficiente de variabilidad en toda la región, que puede ser aproximado por la siguiente ecuación:

$$C_v = -3.10^{-6} D^2 + 0.0114D + 6.6556 \quad (8)$$

con un coeficiente de correlación de $r=0.80$, válida entre 0 y 1600 kilómetros. La distribución obtenida puede observarse en la Fig. 4. Tratando los coeficientes de esta cuadrática de la misma manera que en los otros dos casos anteriores, esto es, multiplicando por $Z=1.644$ y dividiendo por $(2^{0.5})$, se podría concluir que el error de estimación de los promedios mensuales de heliofanía en todas las estaciones de la región considerada es de 7.7%.

4. COMENTARIOS

Como se pudo ver, la inclusión de las estaciones de Brasil prácticamente no modificó el comportamiento del coeficiente de variabilidad de la región anterior ya que, como Uruguay (y también Paraguay), utiliza el mismo tipo de fajas en sus heliógrafos. Las fajas de Argentina no cumplen, al menos de manera constante, con las especificaciones fijadas por la OMM; en un trabajo en el que se intentó cuantificar ese comportamiento (Roldán *et al.*, 2005) se mostró la dispersión de valores obtenidos con las fajas utilizadas pero no se pudo cuantificar su umbral. Sin embargo, y tal como se mencionó ya antes en este trabajo, producen un error superior a las del Uruguay (y, en consecuencia, que las de Brasil).

Tabla 3. Estaciones del Brasil agregadas a los conjuntos anteriores (incluye Corrientes Aero, Reconquista Aero y Ceres Aero, de Argentina)

Estación	Nº	Lat [°]	Long [°]
Corrientes Aero	27	-27.45	-58.76
Reconquista Aero	28	-29.18	-59.70
Ceres Aero	29	-29.88	-61.95
Monte Caseros	30	-30.26	-57.65
Uruguiana	31	-29.75	-57.08
Santa María	32	-29.70	-53.70
Caxias do Sul	33	-29.17	-51.20
Torres	34	-29.35	-49.72
Encruzilhada do Sul	35	-30.53	-52.52
Porto Alegre	36	-30.05	-51.17
Bagé	37	-31.33	-54.10
Rio Grande	38	-32.03	-52.10
Santa Vitória do Palmar	39	-33.52	-53.35
São Luiz Gonzaga	40	-28.40	-55.02
Cruz Alta	41	-28.63	-53.60
Passo Fundo	42	-28.22	-52.40

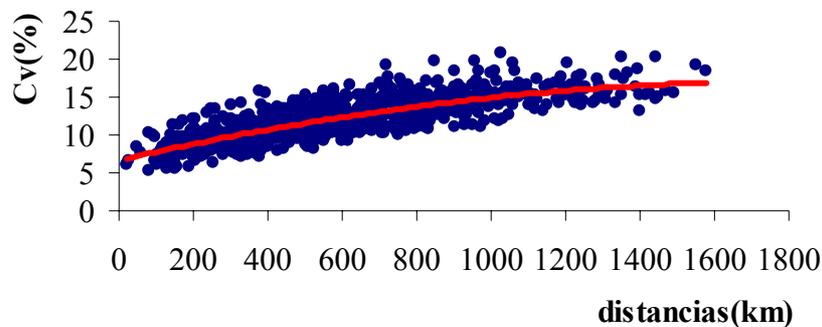


Figura 4. Variación anual del coeficiente de variabilidad (%) en función de la distancia entre estaciones (km) en la región climática Cfa.

De todas maneras, si se multiplica la Eq. 8 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 heliofanía en la región hasta distancias de 230 kilómetros sin exceder un error del 15%, lo cual nos está indicando la marcada homogeneidad de su territorio y la adecuada cobertura brindada por su red de estaciones.

Agradecimientos

Los autores desean formular su agradecimiento a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina 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 y del Instituto Nacional de Meteorología del Brasil, sin cuyo aporte no hubiera sido posible la realización de este trabajo. También desean agradecer la colaboración prestada por miembros del Instituto de Clima y Agua del Instituto Nacional de de Tecnología Agropecuaria de Argentina. Este trabajo se llevó a cabo dentro del Convenio de Cooperación Mutua entre el SMN y la UNLu.

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.
- Grossi Gallegos, H. Lopardo, R. 1985. Variabilidad espacial de los valores de la radiación solar global obtenidos por la Red Solarimétrica en la Pampa Húmeda. Actas de la 10ma. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, Neuquén, Neuquén, pp. 167-176.
- Grossi Gallegos, H. Atienza, G. 1992. Análisis del comportamiento espacial de los datos de radiación solar en la Pampa Húmeda argentina, Memoria del IV Congreso Interamericano y I Iberoamericano de Meteorología, Cáceres y Salamanca, España, Tomo I, pp. 216-220.
- Hay, J. E. 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*, vol. XXIII, n. 3, pp. 223-237.
- Raichijk, C. Grossi Gallegos, H. Righini, R. 2006. Análisis de los datos de heliofanía en la República Oriental del Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 8, n. 2, versión CD-ROM (enviado para su publicación).
- Roldán, A. Righini, R. Grossi Gallegos, H. 2005. Análisis preliminar de las fajas de heliógrafos utilizados en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 10, n. 2, pp. 11.09 -11.13 versión CD-ROM.
- Secretaría General del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo – CYTED 2000. Memoria 1998-99, 211 p., Madrid, España.
- Sukling, Ph. 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.*, vol. 22, pp. 488-494.

SPATIAL VARIABILITY OF SUNSHINE HOURS IN THE ARGENTINE PAMPA HUMEDA, URUGUAY AND SOUTHERN BRAZIL

Abstract. *The spatial coverage of land measurement networks cannot fulfill all the users's needs because in many world regions - if not in all of them - their density is low; and this fact becomes all the more important in the case of solar radiation. The scarcity of global irradiation data with representative time and space statistical conditions is the reason for using sunshine hours in order to estimate them through different correlations which have shown a good fit with the measurements performed. In order to attempt drawing charts with the spatial distribution of the sunshine-hours monthly averages (and from them, global solar irradiation charts also) on such a vast territory as South America, it is necessary to study the error-distance relationship between stations in homogeneous zones. For that purpose, it is usual to analyze the spatial behaviour of certain statistics data of the random fields such as, for example, the structure function. In this paper, as a first step for the integration of the South American plain region, data were used from sunshine hours monthly data from the Argentine Pampa Humeda, Uruguay and Southern Brazil (comprised in only one region, according to Koeppen's climate classification) and their variation according to the distance between stations was analyzed. Several graphs, corresponding to different times within the year are presented, and their similarities and differences are analyzed in order to determine the spatial extrapolation conditions of the information.*

Key words: *Sunshine Hours, Spatial Variability, Cfa Climatic Region*