



ACERCA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA HELIOFANÍA EN ARGENTINA

H. Grossi Gallegos⁽¹⁾, R. Righini

División Física, Departamento Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7, (6700) Luján,
Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323) 423171 - Fax (54-02323) 425795 – e-mail: righini@mail.unlu.edu.ar

RESUMEN: Ante la escasez de datos medidos de irradiación solar lo suficientemente precisos y que satisficieran las condiciones estadísticas como para ser considerados representativos en el tiempo y en el espacio, aparecieron alternativas para estimarlos a partir de la información meteorológica existente, siendo uno de los valores utilizados las horas de insolación (n), también conocido como heliofanía. En este trabajo se presentan los primeros resultados acerca de la distribución espacio-temporal de este parámetro en Argentina, utilizando como herramienta los métodos de interpolación geoestadística y teniendo en cuenta su variación con la altura como primer paso para mejorar las cartas de irradiación solar existentes.

Palabras Clave: heliofanía, distribución espacial, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Ante la escasez de datos medidos de irradiación solar lo suficientemente precisos y que satisficieran las condiciones estadísticas como para ser considerados representativos en el tiempo y en el espacio, aparecieron alternativas para estimarlos a partir de la información meteorológica existente, siendo uno de los valores utilizados las horas de insolación (n), también conocido como heliofanía.

Los heliógrafos (también conocidos como heliofanógrafos) tienen por objeto medir la duración de la insolación (heliofanía efectiva). La Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.) se encargó de estudiar el principio de funcionamiento de este equipo, esencialmente la convergencia de los rayos solares sobre una faja de papel que provoca que ésta se quemé. Se encontró que esto ocurre cuando los valores de la radiación solar directa superan un umbral que presenta cierta variabilidad, dependiendo de la ubicación geográfica del instrumento, del clima y del tipo de faja utilizada. En promedio, ese valor se encontró que variaba de 100 a 200 W/m², conviniéndose posteriormente en que el mismo fuera de 120 W/m² cuando se usan las fajas fabricadas a tal efecto (O.M.M., 1982); sin embargo, se han encontrado valores que van de 16 a 400 W/m² (Gueymard, 1993).

El instrumento recomendado para la medición de la duración de la insolación es el heliógrafo del tipo Campbell-Stokes con las fajas especificadas por el Servicio Meteorológico de Francia, las que fueron diseñadas de conformidad con la O.M.M.. Las mismas tienen impresa una escala con un paso de media hora, siendo posible apreciar por un observador experimentado hasta décimos de hora. Este equipo (inventado por Campbell en 1853 y modificado por Stokes en 1879) consiste en una esfera sólida de vidrio pulido que se comporta como una lente convergente montada de tal manera que en su foco se aloja la faja de registro diario.

Al usar datos de horas de insolación relativas n/N , en donde N es el máximo número de horas astronómicamente posibles de ser registradas, se elimina la dependencia de las horas de brillo solar con la latitud y con la declinación, restando la influencia de la nubosidad.

Algunos autores han utilizado para N el número máximo de horas registrado en la información local en un *día claro*, pero esta definición no coincide con la primera porque el heliógrafo, como se menciona en el capítulo anterior, tiene un umbral por debajo del cual no responde (por eso es que, usando la definición astronómica, el cociente n/N nunca alcanza el valor unitario, mientras que en el otro caso sí).

El utilizar la heliofanía relativa implica la necesidad de tomar también la radiación relativa a algún valor:

$$H/H_{\text{máx}} = f(n/N) \quad (1)$$

(en donde H indica la irradiación solar global), siendo la lineal la relación más sencilla a plantear:

$$H/H_{\text{máx}} = a + b(n/N) \quad (2)$$

¹ Miembro de la Carrera de Investigador del CONICET

La primera expresión utilizada fue la propuesta por Ångström (1924) bajo la forma:

$$H/H_c = \alpha + (1 - \alpha)(n/N) \quad (3)$$

en donde H_c es la irradiación de cielo claro; ya anteriormente Kimball (1919) había graficado la irradiación relativa mensual en función de la heliofanía relativa mensual para tres ubicaciones en EEUU y obtenido una recta de pendiente 0.78 y ordenada en el origen 0.22. Ångström encontró para Estocolmo un valor de α de 0.25, pero no aclaró en base a qué datos lo determinó. Recién en 1956 especificó que se trataba de medias mensuales y que no podía aplicarse a valores diarios.

Dada su simplicidad, muchos autores aplicaron en diferentes lugares del mundo correlaciones de este tipo, pero debe tenerse cuidado en especificar el tipo de datos utilizados (diarios, decadales, quincenales o mensuales), la correspondencia a una o varias estaciones de registro y la época del año en que se determinaron.

De todas maneras, se mantenía aún la necesidad de contar con registros de H_c ; para evitarlo, Prescott (1950) utilizó el valor H_0 correspondiente a la irradiación recibida al tope de la atmósfera. A partir de allí, la mayoría de los investigadores han usado esta ecuación para evaluar la irradiación global H , denominando al cociente *índice de claridad o de transparencia atmosférica* K_t .

En los diferentes países de la región en base a este tipo de correlaciones se complementaron bases de medición (ya que, en general, el número de heliógrafos en un país es mayor que el de sensores de radiación), se prepararon tablas o se trazaron cartas anuales o mensuales con la distribución espacial de la irradiación solar global; en Argentina fueron Crivelli y Pedregal (1972) quienes elaboraron de esta forma las primeras cartas con la distribución de la irradiación global. Por todo lo dicho anteriormente, estas primeras cartas revisten más un carácter cualitativo que cuantitativo y estuvieron orientadas a satisfacer las demandas locales de información formuladas por ingenieros, agrónomos, arquitectos e investigadores interesados en el aprovechamiento de la energía solar; a pesar de la mencionada incerteza en los valores absolutos, fueron de gran utilidad para los primeros pasos de las aplicaciones de esta tecnología en la región. Un trabajo muy completo sobre esta temática, que merece su consulta por parte de los interesados, es el debido a Martínez Lozano *et al.* (1984).

La tendencia actual de los trabajos es derivar esta relación a partir de propiedades instantáneas de la radiación solar. Así, Suehrcke (2000) dedujo una relación cuadrática entre ambos valores relativos: aproximando la heliofanía relativa mensual n/N por el cociente entre el valor medio mensual de la irradiación directa diaria H_b y el valor medio mensual de la correspondiente a la directa diaria en días claros $H_{b,c}$ (ambas medidas sobre un plano horizontal), esto es,

$$\overline{n/N} \cong \overline{H_b} / \overline{H_{b,c}} \quad (4)$$

propuso que la fracción de tiempo con días claros f_c (que estima con la heliofanía relativa) podría calcularse por la siguiente expresión:

$$\overline{n/N} = \left(\overline{K} / \overline{K_c} \right)^2 \quad (5)$$

en donde $\overline{K} = \overline{H/H_0}$ y $\overline{K_c} = \overline{H_c/H_0}$ retornando a la denominación que utilizara Ångström para día claro, valor que se determinaría localmente, mientras que para valores diarios tomaría la forma:

$$n/N = \left(K / K_c \right)^3 \quad (6)$$

Como el valor medio de K_c varía en general entre 0.65 y 0.75, asignarle el valor 0.70 le daría carácter universal. Un ensayo de la expresión propuesta para los valores medios mensuales practicado sobre un conjunto de datos registrados a escala mundial (Driesse y Thevenard, 2002) mostró que la relación se comporta adecuadamente en un sentido general (sobre todo para valores bajos de la heliofanía relativa), pero que la irradiación estimada presenta una gran dispersión (12% en promedio) y que no queda claro estadísticamente que su capacidad predictiva supere a la de los viejos modelos. El principal interés es su simplicidad y la elegancia de su derivación, pero tampoco abarca la diversidad de condiciones locales que pueden afectar a la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, lo que refuerza una vez más la necesidad ya expresada de derivar localmente este tipo de correlaciones.

MATERIALES Y METODO

El Servicio Meteorológico Nacional cuenta en su Banco de Datos con información proveniente de 197 estaciones en las cuales se ha medido la heliofanía diaria, número que supera en mucho al de aquéllas en las que alguna vez se midió la irradiación global. Cabe acotar que, para completar la base de datos con la que se elaboraron las cartas de Argentina (Grossi Gallegos, 1998a y b), se utilizó parte de esa información a fin de estimar los valores medios de la irradiación global a partir de correlaciones de Ångström-Prescott.

Con la intención de tratar de mejorar la resolución espacial de las cartas mencionadas bajo este enfoque se encaró el análisis de la distribución de la heliofanía, tanto efectiva cuanto relativa, utilizando técnicas geoestadísticas para interpolar sus valores medios mensuales (Righini y Grossi Gallegos, 2001).

Para asegurar la representatividad de los promedios para la mayoría de las estaciones, dentro de la incerteza de la medición, se utilizaron series con más de 10 años de datos (Roberti *et al.*, 2002); en este mismo trabajo se descartó la existencia de tendencias temporales con un nivel de significación del 5%.

Esto llevó a que se emplearan valores históricos de 131 estaciones de Argentina, 16 de Brasil, 7 de Paraguay y 23 el sur de Chile; la información considerada de estos últimos países corresponde a ubicaciones confiables cercanas a la frontera del país, las que fueron seleccionadas para dar continuidad a las isolíneas de heliofanía más allá de los límites políticos.

La zona del Noroeste Argentino fue analizada con especial cuidado, debido a que existen en ella mayormente registros de estaciones situadas a poca altura respecto al nivel del mar. Sin embargo esta región presenta altitudes importantes en vastas áreas, por lo que considerar solamente los datos de las estaciones disponibles puede generar una distorsión en los mapas que los aleje significativamente de la realidad, teniendo además en cuenta que presenta un número de días con bajos valores de nubosidad (menor o igual que 2/10 de cielo cubierto) en invierno (más de 30) y en verano (entre 5 y 20, fuera de la selva tucumano-oranense), menos de 10 mm de lluvia precipitada en julio y entre 50 y 100 mm en enero (OMM, 1975; SMN, 1960).

Para intentar salvar este inconveniente se estudió la dependencia de la heliofanía efectiva con la altura durante los meses de enero y julio en la zona; se encontró así que la misma es aproximadamente lineal, obteniéndose las pendientes y las ordenadas al origen de la recta de correlación para los meses analizados (figura 1), mientras que el promedio anual indica un incremento de más de una hora cada mil metros. Con dichos valores se estimaron promedios de heliofanía efectiva para sitios

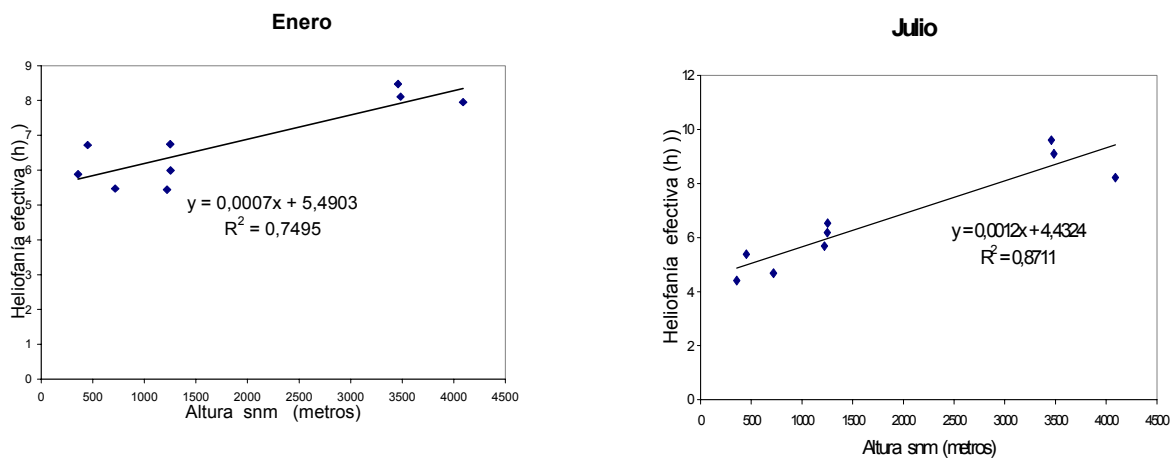


Figura 1. Dependencia de la heliofanía efectiva con la altura durante los meses de enero y julio en las 9 estaciones consideradas del Noroeste Argentino.

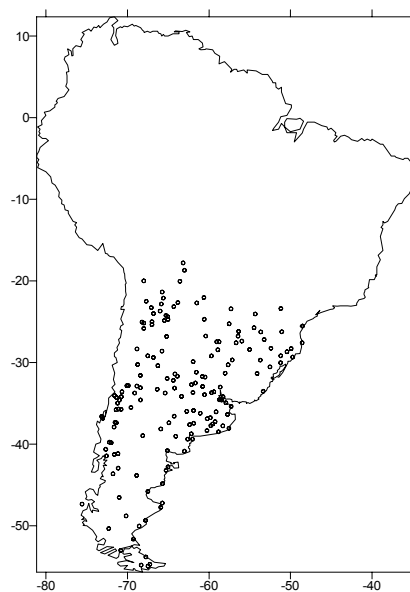


Figura 2. Ubicación de todas las estaciones y sitios considerados para el análisis de la heliofanía efectiva..

ubicados a alturas representativas de vastas zonas de la Puna Argentina y Boliviana (para hacer válida su extrapolación, se seleccionaron en general ubicaciones correspondientes a salares de altura), valores que posteriormente fueron incorporados al análisis realizado empleando la metodología geoestadística ya mencionada. El proceso de kriging se realizó sobre los datos de heliofanía relativa con el objeto de remover las tendencias asociadas con la variación de la duración del día con la latitud y el mes, las que fueron luego adicionadas para obtener como resultado final los mapas de heliofanía efectiva.

RESULTADOS

En las figura 3 se presentan las cartas con la distribución de la heliofanía efectiva expresada en horas para los meses de enero y julio en Argentina, obtenidas empleando kriging y un variograma lineal.

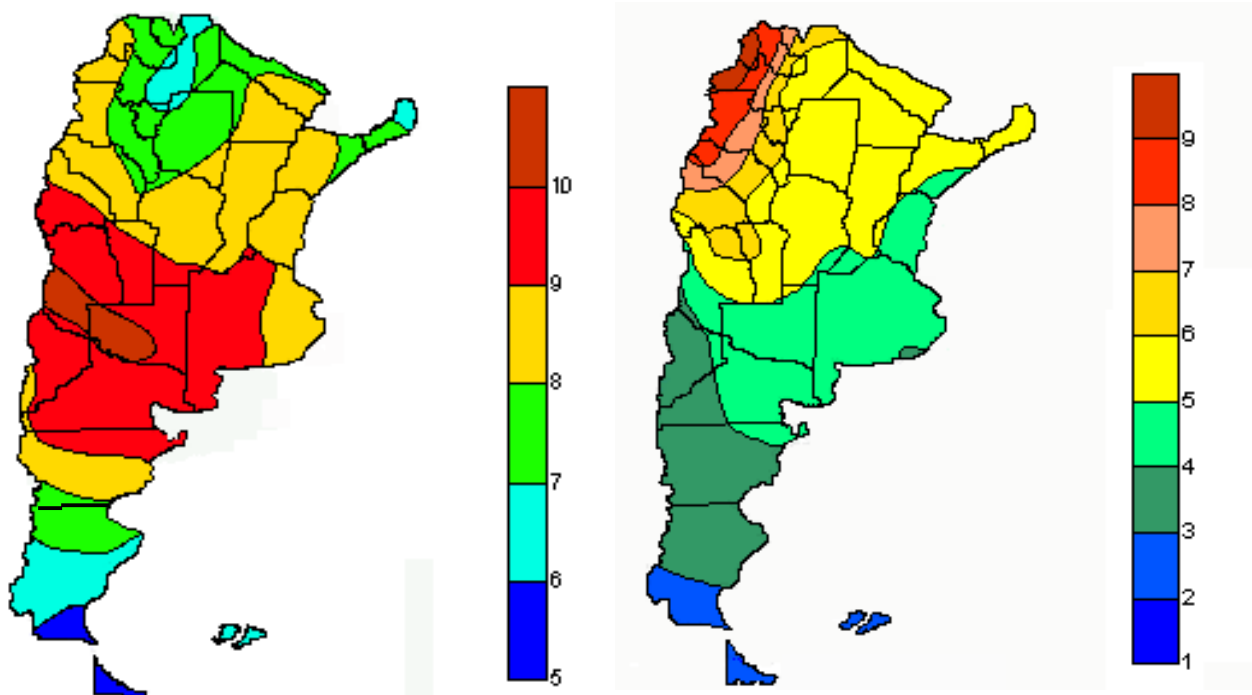


Figura 3. Distribución espacial de la heliofanía efectiva (en horas) correspondiente a los meses de enero (izquierda) y julio (derecha).

CONCLUSIONES

El análisis en esta primera etapa de los mapas de heliofanía para los meses de enero y julio en la República Argentina muestra una correlación razonable con los mapas de irradiación solar global obtenido para esos meses por Grossi Gallegos. Esta correlación indicaría como primera conclusión que las estaciones consideradas fueron las suficientes y su ubicación geográfica la adecuada como para representar la variabilidad geográfica y estacional que presenta la heliofanía. La disminución en las horas de sol correspondientes al mes de enero en la cuña boscosa de la selva Tucumano-Oranense se aprecia plenamente; asimismo, los altos valores de radiación solar existente en el noroeste Argentino se ven representados en la carta de julio, lo que indica lo acertado de considerar las interpolaciones encontradas para la variación de la heliofanía con la altitud durante los meses analizados. Si dichos valores no fuesen tomados en cuenta, los mapas obtenidos no reflejarían la distribución que presentan las horas de sol en dicha zona ya que el trazado de las isolíneas se vería afectado fuertemente por los valores existentes en las zonas de medición de poca altura donde mayormente se encuentran instalados los heliógrafos.

Si bien fueron consideradas algunas estaciones ubicadas en el Sur de Chile, es necesario un estudio posterior detallado para considerar el efecto de la cordillera de las Andes en las isolíneas, si bien las muy frecuentes y abundantes precipitaciones en el faldeo occidental (con promedios anuales de hasta 4.000 mm a 6.000 mm) y extremadamente escasas en toda la región ubicada a sotavento más allá de la costa atlántica (200 mm a 400 mm) parecen justificar los resultados.

Como conclusión final estimamos que se puede considerar a las cartas obtenidas como una representación adecuada de la distribución de la heliofanía efectiva de Argentina durante los meses analizados. Las mismas son compatibles con los antecedentes y con lo esperado, representando a la vez una información valiosa dado lo extenso de las series temporales de datos analizados para obtenerlas. Los pasos sucesivos deberían darse en el sentido de obtener las cartas para los meses restantes, calculando posteriormente la irradiación solar global con alguno de los modelos ya mencionados que se basan en ellas y cotejar los resultados obtenidos con las cartas de irradiación existentes.

REFERENCIAS

- Ångström A. (1924) Solar and terrestrial radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* vol. 50, pp. 121-125.
- Crivelli E. y Pedregal M. A. (1972) Cartas de radiación solar global de la República Argentina. *Meteorológica*, vol. III, N° 1, 2, 3, pp. 80-97.
- Driesse A. and Thevenard D. (2002) A test of Suehrcke's sunshine-radiation relationship using a global data set. *Solar Energy* vol. 72 No. 2, pp. 167-175.
- Grossi Gallegos H. (1998a) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 4, pp.119-123.
- Grossi Gallegos H. (1998b) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 5, pp. 33-42.
- Gueymard C. (1993) Analysis of monthly average solar radiation and bright sunshine for different thresholds at Cape Canaveral, Florida. *Solar Energy* vol. 51, pp. 139-145.
- Kimball H.H. (1919) Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States. *Mon. Weather Rev.* vol. 47, pp. 769-793.
- Martínez-Lozano J. A., Tena F., Onrubia J. E. and De la Rubia J. (1984) The historical evaluation of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 33, pp. 109-128.
- O.M.M. (1975) *Atlas Climático de América del Sur*, vol. I (J. Hoffmann, Ponente). Organización Meteorológica Mundial, UNESCO, Cartographia, Budapest, Hungría, 28 cartas.
- Prescott J.A. (1940) Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. Sci. Aust.* vol. 64, pp. 114-125.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2001) Utilización preliminar de información GOES y métodos geoestadísticos para la evaluación del recurso solar en Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM .
- Roberti, A., Renzini, G., Sierra, V., Grossi Gallegos, H. (2002) Primeros resultados del análisis estadístico de los datos de heliofanía en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, Versión CD-ROM.
- S.M.N. (1960) *Atlas Climático de la República Argentina*, Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Suehrcke H. (2000) On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström's equation revisited. *Solar Energy* vol. 68 No. 5, pp. 417-425.

ABSTRACT: The insufficient solar irradiation data with statistical conditions for temporal and space representativity is the motivation for using meteorological information to estimate them. Bright sunshine hours (n) are in general employed with this propose. In this work the first results of bright sunshine hours spatial distribution in Argentina are shown. Geostatistical interpolation (kriging) and the dependence on altitude were used as a first step for enhance the available irradiation maps.

Keywords: bright sunshine hours, spatial distribution, Argentina.