

## ANÁLISIS PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO DE FAJAS DE HELIÓGRAFOS UTILIZADAS EN ARGENTINA

A. Roldán<sup>1</sup>, R. Righini<sup>1</sup>, H. Grossi Gallegos<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> GERSolar, División Física, Departamento Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Rutas 5 y 7,  
(6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-2323) 440241 o 423171 int. 270

<sup>2</sup> División Radiación Solar San Miguel, Servicio Meteorológico Nacional, Avenida Mitre 3100,  
(1663) San Miguel, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-11) 4455 6762

E-mail: righini@mail.unlu.edu.ar

**RESUMEN:** Los heliógrafos de tipo Campbell-Stokes han sido desde hace mucho tiempo los instrumentos utilizados para medir las horas de brillo solar en todo el mundo y sus registros los más empleados para estimar la irradiación solar global. Las fajas de papel colocadas en él deben quemarse cuando la radiación solar supera un valor umbral preestablecido. En el presente trabajo se analizan las desviaciones presentes de ese valor umbral en fajas usadas en Argentina, y se discuten los errores provocados por estas desviaciones. Se encuentra que el coeficiente de variabilidad en las fajas es del 30%, lo que originaría errores en la medición de heliofanía relativa que si situarían entre el 5 y el 10%, siendo del mismo orden los errores en la determinación de la radiación solar global mediante la relación de Ångström – Prescott.

**Palabras clave:** heliógrafos, umbral de radiación, Argentina.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los heliógrafos del tipo Campbell-Stokes han sido, y son todavía, el instrumento de medición de la heliofanía efectiva (horas de brillo solar) más difundidos en todo el mundo. Consisten en una esfera sólida de vidrio pulido que funciona como lente, concentrando en cualquier momento del día los rayos solares en un foco en el cual se coloca una faja de papel con marcas impresas cada media hora; éstas son quemadas por la radiación solar directa siempre que la misma supere un cierto umbral de intensidad.

El movimiento aparente del Sol a lo largo del día determina una línea donde el papel ha sido quemado, la que se extiende a lo largo de la faja; contando el largo de la línea quemada se determinan las horas de brillo solar o heliofanía efectiva, siendo posible para un observador experimentado apreciar los décimos de hora (Grossi Gallegos, 2004).

Usualmente se emplea la heliofanía relativa como dato relevante para la estimación de la irradiación solar. La heliofanía relativa  $\sigma$  es el cociente entre las horas de brillo solar  $n$  medidas por medio del heliógrafo y la duración astronómica del día  $N$ , la que depende de la latitud del lugar y del día del año.

La correlación más utilizada entre los valores medios de heliofanía relativa y el cociente entre los valores medios de la irradiación solar global y el correspondiente a días claros fue propuesta por Ångström (1924):

$$\frac{H}{H_c} = \alpha + (1-\alpha) \cdot (n/N) \quad (1)$$

en donde  $\alpha$  es una constante de ajuste,  $H$  es el promedio de la irradiación solar global diaria y  $H_c$  el correspondiente a días de cielo claro. Dada la dificultad de definir de manera precisa este valor medio, Prescott (1950) empleó en su lugar el valor  $H_0$  correspondiente al promedio de la irradiación solar recibida al tope de la atmósfera. A partir de allí, la mayoría de los investigadores han usado esta expresión para estimar el promedio de la irradiación global diaria, denominando al cociente  $H/H_0$  *índice de claridad o transmisividad atmosférica*  $K_t$ :

$$\overline{K_t} = \frac{\overline{H}}{H_0} = a + b \left( \frac{\overline{n}}{N} \right) \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Recientemente Suehrcke (2000) estableció una nueva expresión que relaciona la heliofanía relativa mensual  $n/N$  con el índice de claridad medio mensual y con el índice medio de día claro a través de la relación:

$$\frac{\bar{n}}{\bar{N}} = \left( \frac{\bar{K}_t}{\bar{K}_c} \right)^2 \quad (3)$$

en donde  $\bar{K}_c = \bar{H}_c / \bar{H}_0$  es el índice medio de claridad para días claros,  $n$  el número de horas de brillo de Sol registradas en un heliógrafo de Campbell-Stokes y  $N$  la duración teórica del día medida en horas. También se ha publicado hace poco tiempo (Bashahu, 2003) otro trabajo en el que se evaluó el ajuste de diferentes expresiones que utilizan la heliofanía relativa para estimar la radiación solar y la difusa en Senegal, todo lo cual permite apreciar claramente la necesidad de evaluar correctamente esta variable meteorológica.

Un alto valor de umbral en la energía necesaria para quemar las fajas subestima sistemáticamente la heliofanía, dando como resultados valores estimados de irradiación solar inferiores a los reales, cualquiera sea el método de correlación usado. Estos errores pueden tener relevancia en el trazado de las cartas de irradiación de una determinada zona. Por supuesto que influye directamente en las cartas con la distribución de la heliofanía (Grossi Gallegos H. y Righini R., 2002), pero también puede hacerlo en las cartas de irradiación solar. Por ejemplo, en las confeccionadas por Grossi Gallegos (1998 a y b) una fracción significativa de las estaciones empleadas para el trazado de las mismas sólo se tenía datos de heliofanía. En casos como éste, las constantes empleadas en la correlación de Ångström-Prescott son calculadas en unas pocas estaciones de medición simultánea de heliofanía y radiación solar (en esos casos, la determinación de los coeficientes de correlación puede compensar los errores de medición en las horas de sol); pero debe tenerse en cuenta que dichos coeficientes luego son empleados en otras estaciones cercanas de medición de heliofanía para estimar allí la irradiación solar global y trazar los mapas, o para la elaboración de cartas por métodos geoestadísticos (R. Righini *et al.*, 2005), de manera que los errores asociados a la medición de horas de brillo solar no son compensados.

Painter (1991, en un trabajo citado por Gueymard, 1993) mostró que el umbral podría variar a lo largo del día y obtuvo valores que iban de 16 a 142  $W/m^2$ , llegando en algunos casos especiales a alcanzar valores de 400  $W/m^2$ . Un análisis realizado por la Organización Meteorológica Mundial (W.M.O.) encontró que, en promedio, el valor umbral de quemado de fajas variaba entre 100 y 200  $W/m^2$ , dependiendo de las fajas empleadas, de las condiciones del clima y de la ubicación geográfica del heliógrafo. Se convino, entonces, que el valor umbral fuese de 120  $W/m^2$  (W.M.O., 1981). Este valor fue recomendado por Gueymard en el trabajo ya citado tras analizar con mediciones pirheliométricas en Cabo Cañaveral las consecuencias de la variación del umbral y el ajuste con las lecturas de heliofanía.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de estudiar el valor umbral de las fajas utilizadas en los heliógrafos de la red del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.) de Argentina, se instaló un dispositivo destinado a medir la energía mínima necesaria para quemar las mismas (una limitante a este trabajo es el hecho de que sólo se dispone de fajas correspondientes a los años 1998 y 1999 ya que el resto fueron destruidas).

En un banco óptico se instaló una lámpara destinada a formar un haz paralelo. Frente al mismo se colocó un dispositivo que consta de un heliógrafo del tipo Campbell-Stokes, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional, y un piranómetro fotovoltaico con colimador, calibrado en la División Radiación Solar San Miguel del S.M.N. La tensión de la lámpara puede ser ajustada por una fuente de tensión variable, de manera que la intensidad producida por la misma puede cambiarse a voluntad. El esquema del dispositivo se muestra en la Figura 1.

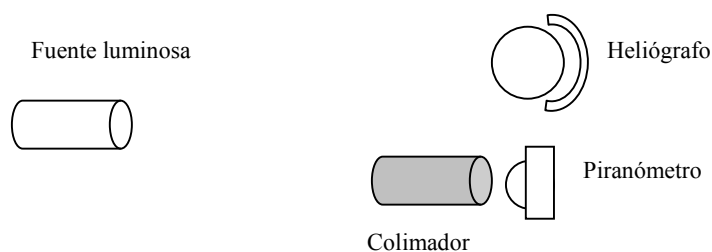


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental de medición del umbral para el quemado de fajas.

Las mediciones se realizaron colocando distintos tipos de fajas en el heliógrafo y variando la intensidad luminosa de la lámpara hasta que las mismas comenzaban a quemarse. En ese momento se medía la intensidad de la radiación directa que llegaba al heliógrafo empleando el piranómetro colimado, cuya constante fue recalculada para este tipo de mediciones. Se registró, simultáneamente, la humedad relativa ambiente junto al dispositivo. Se analizaron así 60 fajas,

provenientes de mediciones realizadas en el heliógrafo que el S.M.N. posee en la localidad de San Miguel (Provincia de Buenos Aires).

Debido a que la imagen de la lámpara producida en el foco del heliógrafo en estas condiciones no era del mismo tamaño que la provocada por el Sol (al igual que su espectro de radiación), las mediciones realizadas no tienen valor absoluto. Sin embargo sí es posible apreciar variaciones relativas en la intensidad umbral entre fajas con un dispositivo de esta naturaleza.

Las fajas fueron medidas quemando en distintos puntos de la misma. La variación en el umbral de intensidad en una misma faja da una idea del error del método, mientras que las variaciones de intensidad umbral entre fajas nos permite estimar la dispersión en los valores umbrales.

Durante el curso de las medidas pudieron apreciarse notables diferencias en los valores umbrales provocadas por la posición de las fajas en relación con el soporte de bronce que se encuentra en la superficie focal. Cuando las fajas se apoyan claramente en el soporte, la intensidad umbral es muy alta, mientras que cuando la zona donde se focaliza la imagen no está apoyada, la intensidad baja sensiblemente.

### 3. RESULTADOS

En la Figura 2 se muestran los valores de potencia umbral obtenidos para las distintas fajas analizadas. Puede verse allí una alta variabilidad entre las fajas, situándose el coeficiente de variabilidad ( $100\sigma/\bar{X}$ ) en un valor de 30 %.

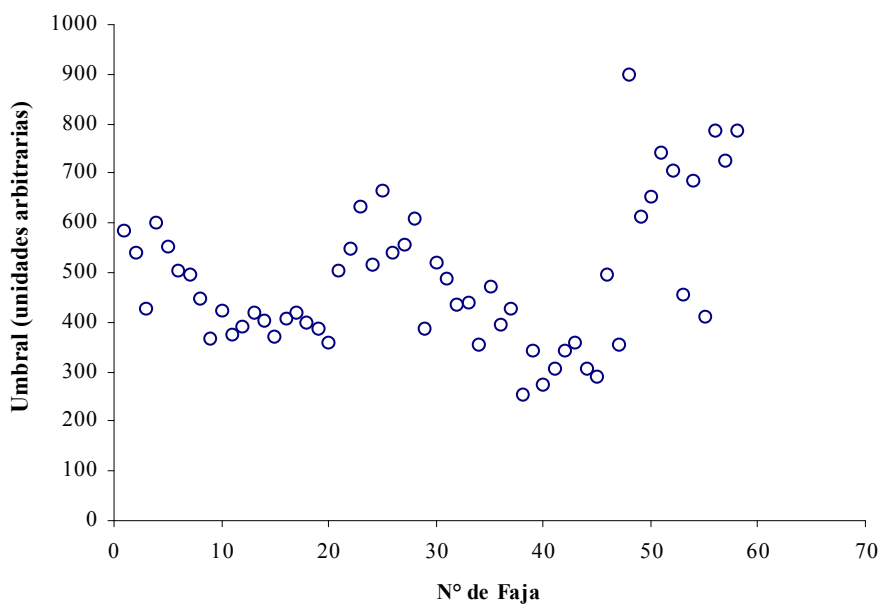


Figura 2. Potencia umbral de quemado para los distintos tipos de fajas analizadas.

Estos desvíos se deben a varios factores. Por un lado dependen, tal como se explicara anteriormente, de la forma en que la faja se apoya (o no) en el soporte del heliógrafo en el que va ubicada. Se observó que cuando la faja apoya, el umbral de energía crece significativamente comparado con el que la faja presenta cuando no está apoyada. También dependen del tipo de tinta con que la faja está impresa: cuando la tinta es más clara el umbral crece comparándolo con el valor que presenta en el caso de tinta más oscura. Por último, parte de la incerteza se debe al propio observador, el cual debe detectar el momento en que la faja comienza a quemarse. Todos estos efectos acumulados explican las desviaciones observadas, y son parte del error cometido en estimar el umbral promedio en cada una de las fajas analizadas.

Por otra parte no fue posible encontrar una relación entre los valores umbrales y la humedad relativa ambiente.

Resulta interesante analizar cuáles serían los errores asociados a la dispersión que presentan los valores umbrales. Para ello puede considerarse un día despejado en el que se haya medido la radiación solar directa de manera continua, para lo

que se tomó el 25 de abril de 2005. En la Figura 3 se muestran los valores de radiación solar directa medidos con un pirheliómetro de incidencia normal (Eppley NIP) promediados cada diez minutos.

Si se consideran fajas cuyo valor fluctúe alrededor del umbral recomendado ( $120 \text{ W/m}^2$ ) con una amplitud igual a la dispersión obtenida en el análisis de fajas (30%), se ve que las horas de inicio de registro de un heliógrafo se situarían entre las 8:00 y las 8:15. Si el valor umbral fuera el indicado por la W.M.O., la faja se marcaría alrededor de las 8:10. Este hecho determina una discrepancia entre fajas que tengan estos umbrales de aproximadamente quince minutos en la medición de heliofanía. El hecho probablemente se repita al ponerse el Sol, aunque es de esperar que no sea exactamente el mismo ya que las fajas se van secando a medida que el día transcurre. No obstante puede llegar a alcanzar en un día como el ejemplificado una diferencia entre los valores de heliofanía medidos con ambas fajas de hasta media hora, lo que representa una diferencia de alrededor del 5 % en la heliofanía relativa. Estos errores serían mayores en días con alta nubosidad, y crecerían en los meses de invierno.

Para tratar de determinar a partir de qué altura solar comienzan a quemarse las fajas en condiciones reales, se analizaron 515 días de medición de la heliofanía en la misma estación ubicada en San Miguel. Como se verificó que no podía establecerse de manera precisa a partir de las fajas quemadas la hora a la que se registraba ese comienzo (porque no siempre se ubican las mismas correctamente centradas en el heliógrafo), se tomaron los días totalmente despejados para aprovechar su simetría respecto al mediodía solar, seleccionándose así los registros de 183 días en esas condiciones (se vio que en general los mismos correspondían a valores de heliofanía relativa mayores o iguales a 0.80).

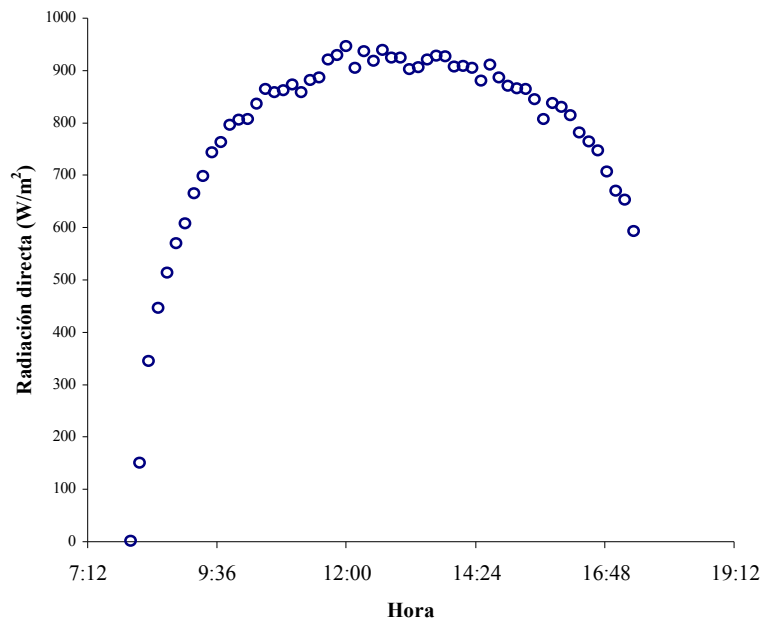


Figura 3. Mediciones de radiación solar directa promediadas cada diez minutos un día típico en San Miguel.

Se determinó así que la altura solar promedio por encima de la cual comenzaron a quemarse las fajas fue  $9.5^\circ$ , con un desvío estándar de  $2.6^\circ$ . También se pudieron observar de esa selección 10 días para los cuales la altura solar determinada fue inferior a los  $5^\circ$ , valor usualmente considerado como límite para la medición del heliógrafo; cabe recordar que fue esta observación la que llevó a Hay (1979) a proponer una nueva fórmula para tener en cuenta este efecto en el cálculo de las horas astronómicas de duración del día, esto es:

$$N' = (1/7.5) \times \arccos[(\cos 85^\circ - \sin \phi \sin \delta) / \cos \phi \cos \delta] \quad (4)$$

Donde  $\phi$  es la latitud del lugar y  $\delta$  es la declinación solar.

#### 4. CONCLUSIONES

A pesar de las posibles diferencias entre las condiciones de trabajo en el laboratorio y en el campo, es posible afirmar que los valores iniciales de la potencia necesaria para el quemado de las fajas de heliógrafos del tipo Campbell-Stokes

utilizados por el S.M.N. con respecto a lo recomendado por la W.M.O. difieren apreciablemente. El coeficiente de variabilidad encontrado en las fajas analizadas es del 30%, hallándose algunas que se desvían mucho de la media. Las diferencias se explican, en principio, por el tipo de papel utilizado, por las diferentes clases de tinta y por la posición relativa de las fajas respecto al soporte de las fajas.

Considerando los resultados anteriores que muestran un alto coeficiente de variabilidad entre los umbrales de las fajas, los errores cometidos en la medición de heliofanía relativa se situarían entre el 5 y el 10 % . Teniendo en cuenta que una de las relaciones más usadas para estimar la irradiación solar global media es la de Ångström –Prescott , se cometerían errores del mismo orden en dicha estimación midiendo la heliofanía con fajas que presentaran umbrales promedios como los encontrados en la muestra analizada, a lo que habría que adicionar el error estadístico introducido en la determinación de la pendiente y la ordenada al origen.

Sería necesario hacer una evaluación exhaustiva del umbral en fajas empleadas por el S.M.N. en todo el país con el objeto de tener un panorama más completo en Argentina, y de esta manera poder determinar con mayor precisión los errores cometidos en la evaluación de la heliofanía al emplear fajas con una gran dispersión en sus valores umbral. Estos resultados podrían afectar los de los análisis de series temporales de esta variable meteorológica ya que la incerteza aumentaría el valor de los errores en los promedios anuales (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2004) y, en consecuencia, el enmascaramiento de las posibles tendencias.

También sería recomendable analizar los valores del umbral de las fajas utilizando mediciones continuas de la radiación solar directa llevadas a cabo con un pirheliómetro de manera simultánea con las lecturas de un heliógrafo de este tipo.

## REFERENCIAS

- Ångström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **50**, 121-125.
- Bashahu, M. (2003) Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. *Solar Energy* **75**, 43-51.
- Grossi Gallegos H. (1998a) ). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información.. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **5**, 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* **5**, 33-42.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2002) Acerca de la distribución de la heliofanía en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **6,2**, 11.37-11.41 versión CD-ROM.
- Grossi Gallegos (2004) *Notas sobre radiación solar*, Luján, Buenos Aires, 225 páginas (ISBN 9879285-19-0).
- Grossi Gallegos, H. y Spreafichi, M. I. (2004) Analisis de los datos de heliofanía en el sur de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6 N° 2, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM (2004).
- Gueymard, C. (1993) Analysis of monthly average solar radiation and bright sunshine hours for different thresholds al Cape Canaveral. *Solar Energy* **51** (2), 139-145.
- Hay, E. (1979) Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* **23** (4), 301-307.
- Prescott, J.A. (1940) Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. Sci. Aust.* **64**, 114-125.
- Righini, R., Grossi Gallegos, H. and Raichijk, C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, **30**, 1241-1255.
- Suehrcke H. (2000) On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström's equation revisited. *Solar Energy* **68**, 5, 417-425.
- W.M.O. (1981) *Guide to meteorological instruments and observing practices*. Publ. No. 8 (TP 3), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

## PRELIMINARY ANALISYS OF THE BEHAVIOUR OF THE CARDS USED IN THE ARGENTINE SUNSHINE RECORDERS

A. Roldán, R. Righini y H. Grossi Gallegos

**ABSTRACT** – Campbell-Stokes heliographs has been utilized for a long time to measure sunshine hours all over the world and is the most employed for estimating solar global irradiation. Bright sunshine burns a path along a special prepared card when direct solar radiation reached or exceed a defined threshold. In this paper the range of thresholds of the cars used in Argentina are analyzed and errors produced by such a deviation are discussed. The variability coefficient of the cards is about 30%, and the associated errors in relative heliofany and estimating solar radiation with Ångström – Prescott relation will be around 5-10%.

**Key words:** heliograph, threshold radiation, Argentina.