

EVALUACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL Y LUMINOSIDAD EN CHILE. II. PROPOSICION DE FORMULAS PARA ESTIMAR LUMINOSIDAD INSTANTANEA Y MEDIA¹

Evaluation of solar radiation and luminosity in Chile. II. Proposal of formulae to estimate instantaneous and average luminosity

Fernando Santibáñez Q.², Haydée Castillo G.² y Juan Vera A.³

SUMMARY

An experimentally derived system to evaluate the quantity and intensity of the flux of natural luminous energy is presented. The proposed equations enable us to estimate the luminous intensity in photometric units, as well as the flux density of photosynthetically active radiation (PAR) in terms of energy. Instantaneous values, daily average values, and the daily total flux of luminous energy can be estimated in both cases.

INTRODUCCION

El 99% de la energía solar está comprendida entre las longitudes de onda 0,3 y 4,0 micrones (Chang, 1977). La radiación visible está comprendida entre 0,4 y 0,7 micrones, constituyendo alrededor del 45% de la radiación total (Montheith, 1973). Este sector del espectro solar se ha denominado "radiación fotosintéticamente activa" (PAR), debido a que es capaz de activar los pigmentos fotosintéticos en los vegetales, por lo que constituye la fuente de energía casi única de los organismos de la biósfera. En general, la energía luminosa es considerada erróneamente un recurso de disponibilidad ilimitada, no obstante su gran importancia como regulador ecológico de la productividad primaria de los ecosistemas. Además de actuar como regulador de la producción fotosintética, la luz interviene en procesos de interés agrícola, tales como la maduración y calidad de frutos, potencialidad de producción de biomasa de los ecosistemas, limitaciones agroecológicas que derivan de su intensidad y distribución mensual, procesos fotoperiódicos, en la economía de agua como parte integrante del balance de energía de las cubiertas vegetales, en efectos fototrópicos y en la conducta animal, entre otros.

Son escasos los antecedentes bibliográficos sobre métodos de estimación de la disponibilidad de energía luminosa natural (Smithsonian Meteorological Tables, 1958; Tombesi, Baroni y Francaviglia, 1975; McCree, 1972; Francis, 1972; Britton y Dodd, 1976). En este trabajo, que constituye el segundo de una serie, se propone un sistema derivado experimentalmente, para la evaluación de la luminosidad y el flujo de radiación fotosintéticamente activa, a partir de la información solarimétrica.

MATERIALES Y METODOS

1. Relación entre la radiación solar global, radiación visible y luminosidad. Considerando que la radiación PAR es una proporción del flujo de radiación solar, las unidades de medida de ésta son esencialmente las mismas, es decir, unidades de densidad de flujo o unidades radiométricas (cantidad de energía o potencia $\times \text{área}^{-1} \times \text{tiempo}^{-1}$). Entre las unidades más usadas y sus equivalencias pueden citarse:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal} \times \text{cm}^{-2} \times \text{min}^{-1} &= \text{langley} \times \text{min}^{-1} \\ &= 697 \text{ W m}^{-2} \\ &= 4,1855 \text{ joules cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \\ &= 4,1855 \times 10^7 \text{ erg cm}^{-2} \\ &\quad \text{min}^{-1} \end{aligned}$$

La intensidad del flujo luminoso se mide en unidades de energía, cuando interesa conocer su magnitud o trabajo que puede efectuar. Existe también una escala relativa, basada en la sensación que esta produce en el ojo humano. De esta forma se han definido unidades

¹ Recepción de originales: 5 de noviembre de 1982.

² Fac. de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales, U. de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile.

³ Dirección Meteorológica de Chile, Dir. Gral de Aeronáutica Civil, Santiago, Chile.

de luminosidad, o unidades fotométricas, de las cuales las más usadas son el foot-candle y el lux*, siendo 1 foot-candle = 10,76 lux.

La radiación solar y la luminosidad están relacionadas en forma estrecha; sin embargo, no es posible establecer una proporción aplicable en cualquier localidad de planeta, si se considera que la fracción PAR/radiación solar varía según el estado de transparencia de la atmósfera. En la literatura se informa de diversos valores que relacionan radiación solar y luminosidad. Estas cifras varían entre 6470 y 7400 foot-candles por langley min^{-1} , para latitudes medias (Smithsonian Meteorological Tables, 1958). Las relaciones entre radiación solar y luminosidad, ambas expresadas en términos de energía, son más escasas, probablemente por la mayor dificultad que representan las mediciones de luz en unidades de energía.

2. Desarrollo de un sistema empírico. Con el objeto de establecer relaciones aplicables en el territorio chileno, se realizaron campañas diarias de registros de la radiación solar global, flujo luminoso solar en unidades de energía y luminosidad en unidades fotométricas. En las mediciones de radiación solar, se utilizó un piranómetro circular Kahlsico, con sensibilidad 0,01 ly min^{-1} . El flujo luminoso se midió con un radiómetro fotómetro LAMBDA Instruments (LI-185A). Los sensores utilizados fueron el LI 190S para la radiación fotosintéticamente activa y el LI 210S para la intensidad luminosa. Ambas corresponden a fotodiodos de silicio con respuesta lineal y sensibilidad máxima entre 400 y 700 nm. Con el objeto de disminuir los errores, se utilizó tres instrumentos de este tipo, considerándose sólo las medidas de luz en cuyo valor coincidieran a lo menos dos de los instrumentos. Las campañas de medición se efectuaron en distintas épocas del año, en un período total de dos años. Se correlacionó los valores instantáneos de radiación y luz, con el objeto de obtener una ecuación que permitiera estimar la intensidad de la luz a partir de mediciones piranométricas. Estas últimas se registran con cierta frecuencia en estaciones meteorológicas que cuentan con información solarimétrica.

La ecuación obtenida relaciona, por lo tanto, valores instantáneos de radiación ($\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$) y luz. En la generalidad de los casos, se precisa conocer los valores medios diarios de ambos parámetros. Para conocer la radiación instantánea media diaria se requiere dos elementos: flujo total diario de radiación solar

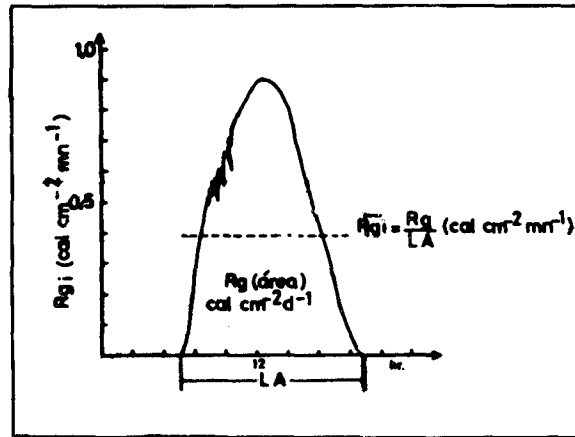


FIGURA 1. Curva actinográfica típica para días despejados. \bar{R}_{gi} = radiación instantánea media diaria; R_g = valor integrado en el día o flujo total diario de radiación; LA = duración del período de registro de radiación solar o largo actinométrico.

FIGURE 1. Typical actinographic curve for clear days. \bar{R}_{gi} = average instantaneous daily radiation; R_g = total daily radiation flux; LA = actinometric length.

(cal cm^{-2} y día^{-1}) y longitud del período con radiación solar mayor que cero (min día^{-1}), o longitud actinométrica (LA), es decir, los conceptos de cantidad y tiempo, cuyo cociente nos da el valor medio (Figura 1). Para el primero de los dos elementos debe recurrirse a las medidas solarimétricas convencionales (actinógrafos) y, si no se cuenta con estos registros, se puede estimar el flujo total diario de radiación según el sistema propuesto para Chile en el primer trabajo de esta serie (Castillo y Santibáñez, 1981).

En el caso del segundo elemento, la longitud actinométrica es dependiente de la latitud y época del año, pudiendo estimarse a partir de la duración teórica de las horas de sol (N), para cada latitud, las cuales se encuentran tabuladas, frecuentemente en la literatura (Smithsonian Meteorological Tables, 1958; Doorenbos y Pruit, 1975). Con el objeto de facilitar los cálculos, se estableció por regresión lineal, una relación entre N y la longitud actinométrica (LA), obtenida de registros actinográficos, la cual es levemente inferior a N, debido a la gran masa atmosférica que deben atravesar los rayos solares cuando la elevación de sol tiende a cero y a accidentes topográficos, especialmente barreras montañosas. Experimentalmente se midió LA como la diferencia en minutos entre el momento en que el actinógrafo marcó el primer valor de radiación solar mayor que cero, en la mañana, y el último en la tarde, lo cual se correlaciona linealmente con N, para distintas épocas del año.

La Figura 2 presenta la secuencia para el cálculo de la luminosidad media diaria.

* 1 foot-candle = 1 lumen pie^{-2}
1 lux = 1 lumen m^{-2}

Un lumen es el flujo luminoso emitido por un cuerpo negro de $1/60 \text{ cm}^2$ de superficie a la temperatura de fusión del platino (2042°K) (Coulson, 1975).

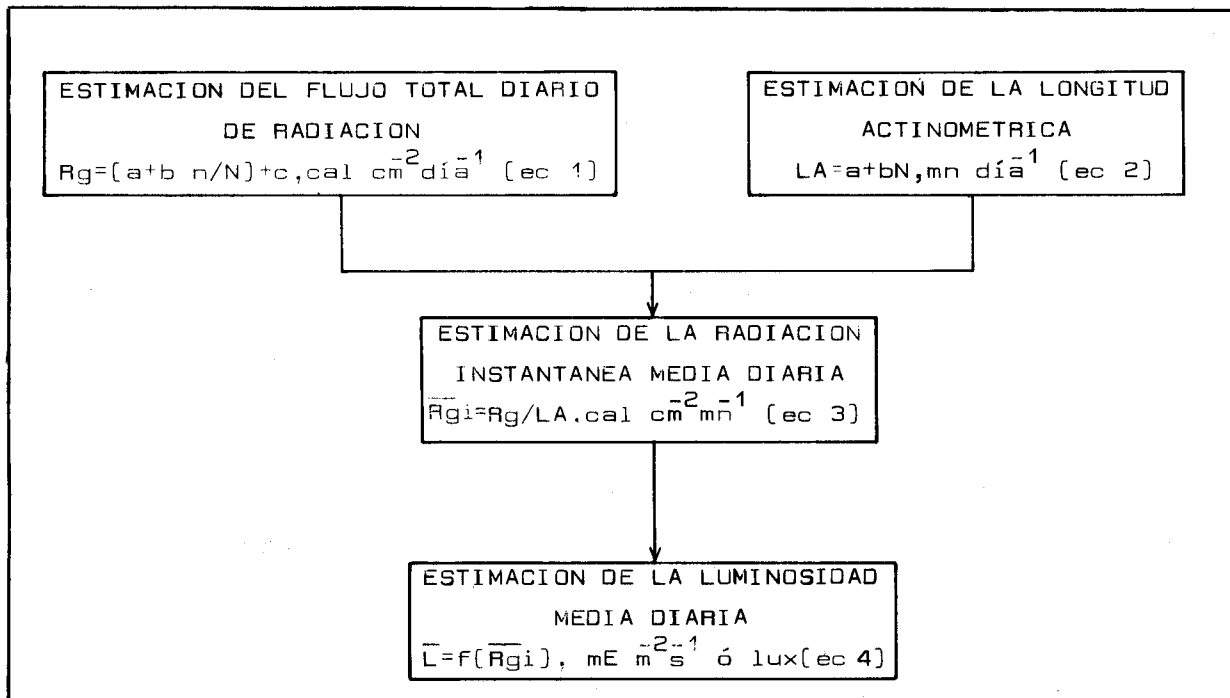


FIGURA 2. Secuencia de cálculo para la intensidad luminosa media diaria.
 FIGURE 2. Calculation sequence for the average daily light intensity.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados experimentales ponen de relieve una relación no lineal entre la radiación solar global y la luminosidad. Si bien el ajuste lineal es aceptable para valores de radiación entre 0 y 0,8 cal cm⁻² min⁻¹, por encima de este último se observa un leve descenso de la pendiente, por lo que la función queda mejor representada por un polinomio de segundo grado (Figura 3):

$$L = 9450 R_g - 903 R_g^2 \quad (ec:5)$$

donde:

L = intensidad luminosa en foot-candle (ft-c)
 R_g = Radiación solar global (cal cm⁻² min⁻¹)

Es importante destacar que, por lo general, la literatura señala relaciones de tipo lineal, donde se asigna una equivalencia de alrededor de 7000 ft-c por cada cal cm⁻² min⁻¹. Estos resultados ponen en evidencia una relación luminosidad/radiación total superior a la señalada por Kimball, citado por Chang (1977), si se considera que la función experimental obtenida en Chile establece 8547 ft-c como valor equivalente a una cal cm⁻² min⁻¹. Para la obtención de la relación experimental, se utilizó valores de diferentes épocas del año, de modo de introducir un máximo de variación de las condiciones atmosféricas.

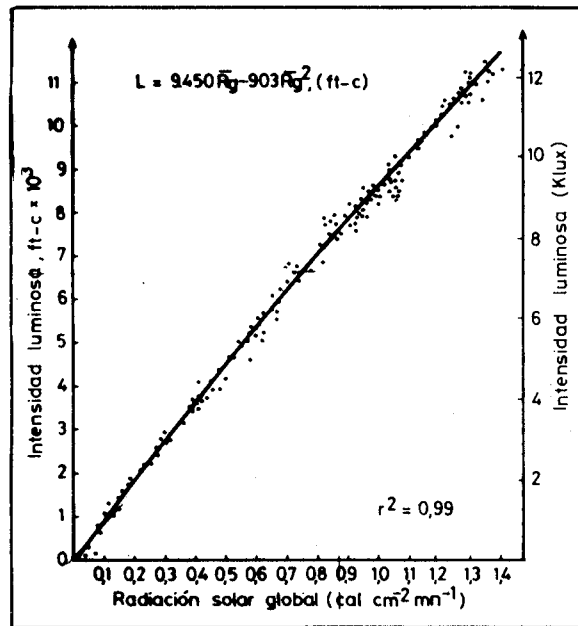


FIGURA 3. Relación experimental entre la radiación solar y la intensidad luminosa.
 FIGURE 3. Experimental relation between solar radiation and light intensity.

En la Figura 4 se presenta la relación experimental obtenida para la estimación de la radiación fotosinté-

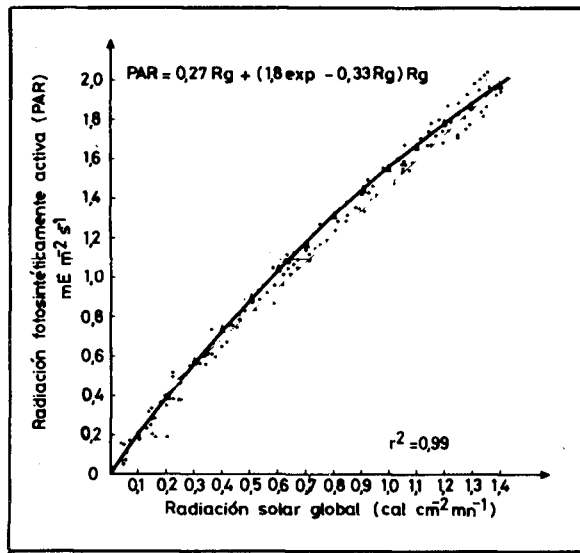


FIGURA 4. Relación experimental entre la radiación solar y la densidad del flujo de luz fotosintéticamente activa (PAR).
 FIGURE 4. Experimental relation between solar radiation and flux density of the PAR.

ticamente activa (PAR); nuevamente se pone de manifiesto una relación no lineal, lo que indicaría que el cociente PAR/Rg disminuye levemente para valores altos de radiación solar. Esto coincide con los resultados obtenidos por Britton y Dodd (1976), quienes encontraron que la fracción de radiación fotosintéticamente activa respecto de la radiación total disminuye, al aumentar la radiación incidente. La disminución del cociente PAR/radiación, para altos valores de esta última, pone de manifiesto la mayor absorción que la atmósfera ejerce sobre la radiación infrarroja respecto de la luz (Norero, 1976). De lo anterior se deduce que la cantidad de energía infrarroja es más sensible que la luz frente a las variaciones de la radiación solar. Esto sería atribuible a que intensidades bajas de radiación solar están normalmente asociadas con mayor nubosidad y mayores contenidos de vapor en la atmósfera, agente que absorbe selectivamente la radiación infrarroja.

La relación experimental entre PAR y radiación solar se ajustó a las siguientes ecuaciones:

$$PAR = 0,27 Rg + (1,8 \exp - 0,33 Rg) Rg \quad (\text{ec:6})$$

donde:

PAR = radiación fotosintéticamente activa (visible) en $\text{mE m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Rg = radiación solar global, $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$

Las ecuaciones 5 y 6 relacionan valores instantáneos de radiación con luminosidad y PAR (unidades de

tiempo en minutos y segundos). Si se desea obtener valores medios diarios de estas variables, pueden utilizarse las mismas ecuaciones, introduciendo valores medios diarios de radiación solar (\overline{Rg}):

– Intensidad luminosa media diaria

$$\overline{L} = 9450 \overline{Rg} - 903 \overline{Rg}^2 \quad (\text{ec:7})$$

donde: \overline{L} es la intensidad luminosa media diaria en foot-candle y \overline{Rg} es la radiación solar media diaria en $\text{cal cm}^{-2} \text{día}^{-1}$;

– Radiación fotosintéticamente activa media diaria

$$\overline{PAR} = 0,27 \overline{Rg} - (1,8 \exp - 0,33 \overline{Rg}) \overline{Rg} \quad (\text{ec:8})$$

donde: \overline{PAR} es la radiación fotosintéticamente activa media diaria, en $\text{mE m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y la \overline{Rg} instantánea media diaria

$$\overline{Rg} = \frac{RA (a + b n/N) + c}{64,2 N - 116,4} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \quad (\text{ec:9})$$

En la ecuación 9 el numerador expresa el flujo diario de radiación, estimado con la fórmula de Ångström, corregida para cada localidad de Chile (Castillo y Santibáñez, 1981). De no contarse con correcciones locales, puede utilizarse la ecuación de Ångström sin corregir, donde los coeficientes originales son: $a = 0,25$, $b = 0,50$ y $c = 0$; RA representa la radiación extraterrestre en $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ y n/N la heliofanía relativa. En caso de no disponer de información de horas de sol (n), se puede estimar directamente el valor de la heliofanía relativa (n/N) a partir de la nubosidad, con la ecuación: $n/N = 0,85 - 0,020 x - 0,011 x^2$, donde x corresponde a la cobertura nubosa en octavos. (Castillo y Santibáñez, 1981). El denominador corresponde a una estimación de la longitud actinométrica (LA) en minutos por día, a partir de la duración máxima del período de sol (N).

CONCLUSIONES

1. Los métodos de estimación de la intensidad luminosa propuestos en literatura, presentan una subestimación sistemática que varía entre un 20 y un 37%, cuando se les aplica a las condiciones de la zona central del territorio chileno.
2. Las relaciones experimentales entre intensidad del flujo luminoso y radiación solar ponen de relieve variaciones en la relación radiación total/radiación fotosintéticamente activa, especialmente notables para intensidades de radiación superiores a $0,8 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Este hecho conduce a la obtención de relaciones no lineales entre ambas variables.

El sistema propuesto permite estimar la intensidad del flujo luminoso con márgenes de error relativamente reducidos en la zona central de Chile.

La aplicabilidad de otras relaciones propuestas en literatura muestran subestimaciones notables de la intensidad luminosa en la zona central de Chile. La ecuación de Tombesi (Tombesi, Baroni y Franca-
viglia, 1975):

$$L = 0,07 R_g + 4,78$$

donde: L representa la intensidad luminosa media diaria en Klux, subestima en alrededor de 37% a esta última. Otras relaciones de tipo lineal, como las de Kimball, donde $L = 7000 R_g$, subestima en aproximadamente 20% la intensidad luminosa.

RESUMEN

Se presenta un sistema derivado experimentalmente para la evaluación de la cantidad e intensidad del flujo de energía luminosa natural, a partir de información solarimétrica. Las ecuaciones propuestas permiten estimar la intensidad luminosa en términos

fotométricos y la densidad del flujo de luz fotosintéticamente activa (PAR) en término de energía. En ambos casos pueden estimarse los valores instantáneos, los valores medios diarios y el flujo total diario de energía luminosa.

LITERATURA CITADA

- BRITTON, C.M. and DODD, J.D. 1976. Relationship of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agricultural Meteorology* 17: 1-7.
- CASTILLO G., H. y SANTIBAÑEZ Q., F. 1981. Evaluación de la radiación solar global y luminosidad en Chile. I. Calibración de fórmulas para estimar radiación solar global diaria. *Agricultura Técnica (Chile)* 41(3): 145-152.
- CHANG, J.H. 1977. *Climate and agriculture. An ecological survey.* Aldine. Chicago 304 p.
- COULSON, K. 1975. *Solar and terrestrial radiation. Methods and measurements.* Ac. Press. N. York. 322 p.
- DOORENBOS, J. and PRUIT, W. 1975. Crop water requirements. Irrigation and drainage, paper 24. FAO. Roma.
- FRANCIS, C.A. 1972. Natural daylengths for photoperiod sensitive plants. CIAT. Technical Bulletin Nº 2. 32 p.
- McCREE, K.J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology* 10: 443-453.
- MONTHEITH, J.L. 1973. *Principles of environmental physics.* Edward Arnold. London. 241 p.
- NORERO S., A. 1976. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. CIDIAT. 138 p.
- SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES. 1958. Smithsonian Inst. Washington D.C. p. 442-511.
- TOMBESI, L.; BARONI, R. e FRANCAVIGLIA, R. 1975. Studi di bioclimatologia. Nota I. Territorio di Roma e Zone Ediacenti. Istituto Sperimentale per la Nutrizione delle Piante. Roma. 36 p.