

## INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA TRANSPARENCIA ATMOSFERICA EN SALAMANCA

F. Pablo Dávila, J. L. Labajo Salazar y Clemente Tomás Sánchez  
Departamento de Física General y de la Atmósfera.  
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca

### Resumen

Partiendo de observaciones de radiación solar global diaria ( $G$ ) recibida en Salamanca durante el período 1977-85 sobre una superficie horizontal, y calculando la radiación solar máxima recibida en el límite de la atmósfera ( $H_0$ ), se ha deducido un índice de claridad diario ( $K=G/H_0$ ), que indica el grado de transparencia atmosférica.

Se obtuvieron las frecuencias relativas del índice y su distribución estadística mensual. Además, tomando el valor promedio (marca de clase) sobre un cierto número de días consecutivos elegidos (5, 15 y 25), se comprueba que este valor presenta una distribución que depende del intervalo de días elegido y de la época del año, pudiendo relacionar esta última dependencia con un índice de claridad promedio a largo plazo ( $\bar{K}$ ).

### Abstract

Using nine years (1977-85) continuous records of daily global solar radiation ( $G$ ) at Salamanca, and theoretical values of extraterrestrial solar radiation ( $H_0$ ) on a horizontal plane, the ratio of global to extraterrestrial solar radiation is presented ( $G/H_0=K$ : daily clearness index).

The relative frequencies and monthly statistical distribution were analyzed. Furthermore, choosing the mean value (mark of kind) on a number of consecutive days (5, 15 and 25), the results show that its distribution depends on the chosen interval and the season of the year, and

this last one depends on a long-term average clearness index ( $\bar{K}$ ).

### Introducción

El incremento en los últimos años de los problemas en los que se encuentra involucrada la radiación solar ha hecho que sea imprescindible, frecuentemente, disponer de información sobre el tema para su posterior aplicación en diversos campos, según las necesidades que puedan surgir.

De acuerdo con este planteamiento y basándonos en medidas reales de la radiación global solar diaria acumulada, para una superficie horizontal a nivel del suelo, efectuadas durante el período 1977-85 en el Observatorio de Matacán (Salamanca), se presenta el análisis de la distribución estadística que caracteriza los valores de radiación diaria, así como una primera aproximación de los resultados que ofrezcan la posibilidad de estimar la distribución de la probabilidad de la radiación solar global a lo largo de un número cualquiera de días consecutivos, suponiendo conocido un índice de claridad a largo plazo ( $\bar{K}$ ) previamente definido para la época del año que se está evaluando.

### Procedimiento y resultados

Los datos de radiación global diaria ( $G$ ) se han obtenido de las mediciones realizadas en el Observatorio de Matacán. Los correspondientes a la radiación solar máxima recibida en el límite de

la atmósfera ( $H_0$ ) se han calculado para los días 1, 5, 10, 15, 20 y 25 de cada mes mediante la expresión:

$$H = \frac{24}{\pi} r I_{sc} (\cos L \cos \delta \sin w + w \sin L \sin \delta),$$

donde  $r$  es un factor de corrección de la distancia media Sol-Tierra (y se encuentra en todos los textos de N. Robinson, 1966; I. K. Kondratyev, 1969),  $I_{sc}$  es la constante solar cuyo valor homologado por la N.A.S.A. es  $1.351,53 \text{ W/m}^2$ ,  $L$  es la latitud,  $\delta$  es la declinación solar y  $w$  es el ángulo horario en grados.

El resto de los valores diarios se han interpolado a partir de éstos.

Una vez obtenidos ambos conjuntos de valores se han deducido los índices de claridad diarios, también denominados por otros autores (Liu y Jordan, 1960; Biba y Rosa, 1979) coeficientes de transmisión de la radiación solar, por medio de la expresión

$$K = \frac{G}{H_0}$$

Estos coeficientes de transmisión son función de la elevación solar, el contenido de vapor de agua de la atmósfera, el contenido de polvo, el contenido de ozono y de cualquier otro parámetro que incida en el viaje hasta la superficie de

la tierra, de la intensidad de la radiación solar. Representa por tanto la fracción de radiación solar recibida en una superficie horizontal al nivel del suelo durante un día, e indica el grado de limpieza o transparencia atmosférica.

Por cada uno de los doce grupos (uno por mes) de las nueve series (una por año) de alrededor de treinta observaciones (una por día), los aproximadamente 3.200 datos empleados fueron ordenados de acuerdo con la magnitud de  $K$  en catorce clases, de amplitud 0,05 unidades, y de las frecuencias relativas así obtenidas se dedujeron las distribuciones estadísticas mensuales para Salamanca.

En la tabla 1 y gráfica 1 presentamos estas distribuciones frecuencias, con expresión de sus probabilidades simples y acumuladas para cada uno de los intervalos o clases elegidos. Observamos cómo los intervalos correspondientes a la media y mediana, es decir los indicadores del promedio de las frecuencias y de igual número de observaciones superiores e inferiores a una dada, fluctúan a lo largo de los meses de forma continua, acercándose hacia el intervalo modal (indicador de la mayor frecuencia o mayor número de observaciones desde el mes de enero a los meses de julio y agosto), para deslizarse paulatinamente a medida que nos acercamos al final del año.

TABLA 1  
DISTRIBUCION MENSUAL DE FRECUENCIAS ( $n_i$ ), PROBABILIDADES SIMPLES ( $P_i$ ) Y PROBABILIDADES ACUMULADAS ( $P_r$ )

Días	Enero			Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio		
	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$
1	3	1,07	1,07	4	1,59	1,59	2	0,72	0,72	5	1,85	1,85	1	0,36	0,36	3	1,12	1,12
2	15	5,38	6,45	7	2,78	4,36	7	2,51	3,23	2	0,74	2,59	6	2,15	2,51	4	1,49	2,61
3	23	8,24	14,69	13	5,16	9,52	1	0,36	3,58	11	4,07	6,67	8	2,87	5,38	8	2,98	5,60
4	22	7,88	22,58	15	5,95	15,48	9	3,23	6,81	17	6,30	12,96	13	4,66	10,04	8	2,98	8,58
5	19	6,81	29,39	11	4,36	19,84	18	6,45	13,26	14	5,18	18,15	15	5,38	15,41	22	8,21	16,79
6	24	8,60	37,99	20	7,94	27,78	20	7,17	20,43	20	7,41	25,56	16	5,73	21,15	17	6,34	23,13
7	25	8,96	46,95	26	10,32	38,09	27	9,68	30,11	17	6,30	31,85	26	9,32	30,47	26	9,70	32,84
8	17	6,09	53,05	23	9,13	47,22	25	8,96	39,07	23	8,52	40,37	25	8,96	39,48	26	9,70	42,54
9	16	5,73	58,78	24	9,52	56,75	23	8,24	47,31	20	7,41	47,78	32	11,47	50,90	50	18,76	61,19
10	29	10,39	69,18	20	7,94	64,68	21	7,53	54,84	34	12,59	60,37	38	13,62	64,52	82	30,60	91,79
11	30	10,73	79,93	19	7,54	72,22	40	14,33	69,18	36	13,33	73,70	38	13,62	78,14	22	8,21	100
12	29	10,39	90,32	31	12,30	84,52	56	20,07	89,25	51	18,89	92,59	50	17,92	96,06	0	0	100

TABLA 1 (continuación)

Días	Julio			Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$	$n_i$	$P_i$	$P_r$
1	4	1,43	1,43	1	0,36	0,36	1	0,37	0,37	2	0,72	0,72	9	3,36	3,36	14	5,02	5,02
2	5	1,79	3,23	0	0	0,36	2	0,74	1,11	9	3,24	3,96	13	4,85	8,21	21	7,53	12,54
3	7	2,51	5,73	0	0	0,36	3	1,11	2,23	8	2,88	6,83	19	7,09	15,30	24	8,60	21,15
4	3	1,07	6,81	1	0,36	0,72	0	0	2,23	10	3,60	10,43	19	7,09	22,39	19	6,81	27,96
5	10	3,58	10,39	3	1,08	1,80	4	1,49	3,72	12	4,32	14,75	14	5,22	27,61	30	10,75	38,71
6	16	5,73	16,13	4	1,44	3,24	10	3,72	7,43	18	6,47	21,22	17	6,34	33,95	17	6,09	44,80
7	20	7,17	23,30	10	3,60	6,83	7	2,60	10,04	16	5,75	26,98	11	4,10	38,06	25	8,96	53,76
8	62	22,22	45,52	12	4,32	11,15	20	7,43	17,47	19	6,83	33,81	17	6,34	44,40	23	8,24	62,01
9	129	46,24	91,76	16	5,75	16,91	21	7,81	25,28	26	9,35	43,16	19	7,09	51,49	19	6,81	68,82
10	23	8,24	100	29	10,43	27,34	37	13,75	39,03	40	14,39	57,55	20	7,46	58,95	26	9,32	78,14
11	0	0	100	70	25,18	52,52	70	26,02	65,06	59	21,22	78,78	33	12,31	71,27	39	13,98	92,11
12	0	0	100	119	42,81	95,32	97	32,34	97,40	50	17,99	96,76	48	17,91	89,18	20	7,16	99,28
13	0	0	100	13	4,68	100	7	2,60	100	9	3,24	100	28	10,44	99,63	2	0,72	100
14	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	1	0,37	100	0	0	100

Asimismo, podemos comprobar como la distribución de frecuencias para cada intervalo es más homogénea y continua en los meses extremos del año y, a medida que nos acercamos a los meses centrales, disminuye de manera acusada esta tendencia. Todo esto indica que según nos acercamos a la época del año más calurosa, meses donde la radiación solar presenta sus valores máximos, la variabilidad de la nubosidad, como factor principal en la atenuación de la radiación decrece y, por lo tanto, el índice de claridad o transparencia atmosférica es manifiestamente uniforme, encontrándose cerca del 50 % de las observaciones en el mismo intervalo de clase, tal como indican los valores obtenidos en la distribución de estos índices.

Una vez realizadas las distribuciones estadísticas mensuales del índice de claridad diario, nos preguntamos si tomando el promedio de  $K$  (marca de clase) sobre un cierto número de días consecutivos, en vez de sus valores individuales, no podríamos incluirlos dentro de cada serie mensual.

Se hizo esto para períodos acumulados de 5, 15 y 25 días consecutivos y comprobamos cómo la  $K$  promedio así obtenida presenta una distribución estadística, la cual depende del número de días consecutivos considerados y de la época

del año. Se comprobó además que la dependencia de la época del año puede adscribirse a un índice de claridad promedio a largo plazo ( $\bar{K}$ ), de forma que podemos relacionar estos promedios para días consecutivos, respecto del índice a largo plazo, mediante la expresión

$$K = a(n) \bar{K} + b(n). \quad (1)$$

En la tabla 2 se indican los valores medios mensuales de la radiación global ( $G$ ), radiación extraterrestre o máxima ( $H_0$ ) y los índices de claridad a largo plazo ( $\bar{K}$ ), deducidos en función de datos de radiación tomados de un período discontinuo aproximado de quince años.

TABLA 2

Mes	$G$	$H$	$\bar{K} = G/H_0$
Enero.....	6,516	14,826	0,439
Febrero.....	9,823	19,487	0,504
Marzo.....	14,061	27,463	0,512
Abril.....	17,807	34,623	0,514
Mayo.....	19,963	38,372	0,520
Junio.....	23,438	41,769	0,561
Julio.....	25,132	40,601	0,619
Agosto.....	22,314	36,384	0,613
Septiembre.....	17,540	29,948	0,586
Octubre.....	12,153	22,542	0,539
Noviembre.....	7,896	16,225	0,487
Diciembre.....	5,577	13,231	0,421

Valores medios mensuales, en  $\text{kJ/m}^2$ , de radiación global ( $G$ ), de radiación extraterrestre ( $H_0$ ) y de índice de claridad a largo plazo ( $\bar{K}$ ).

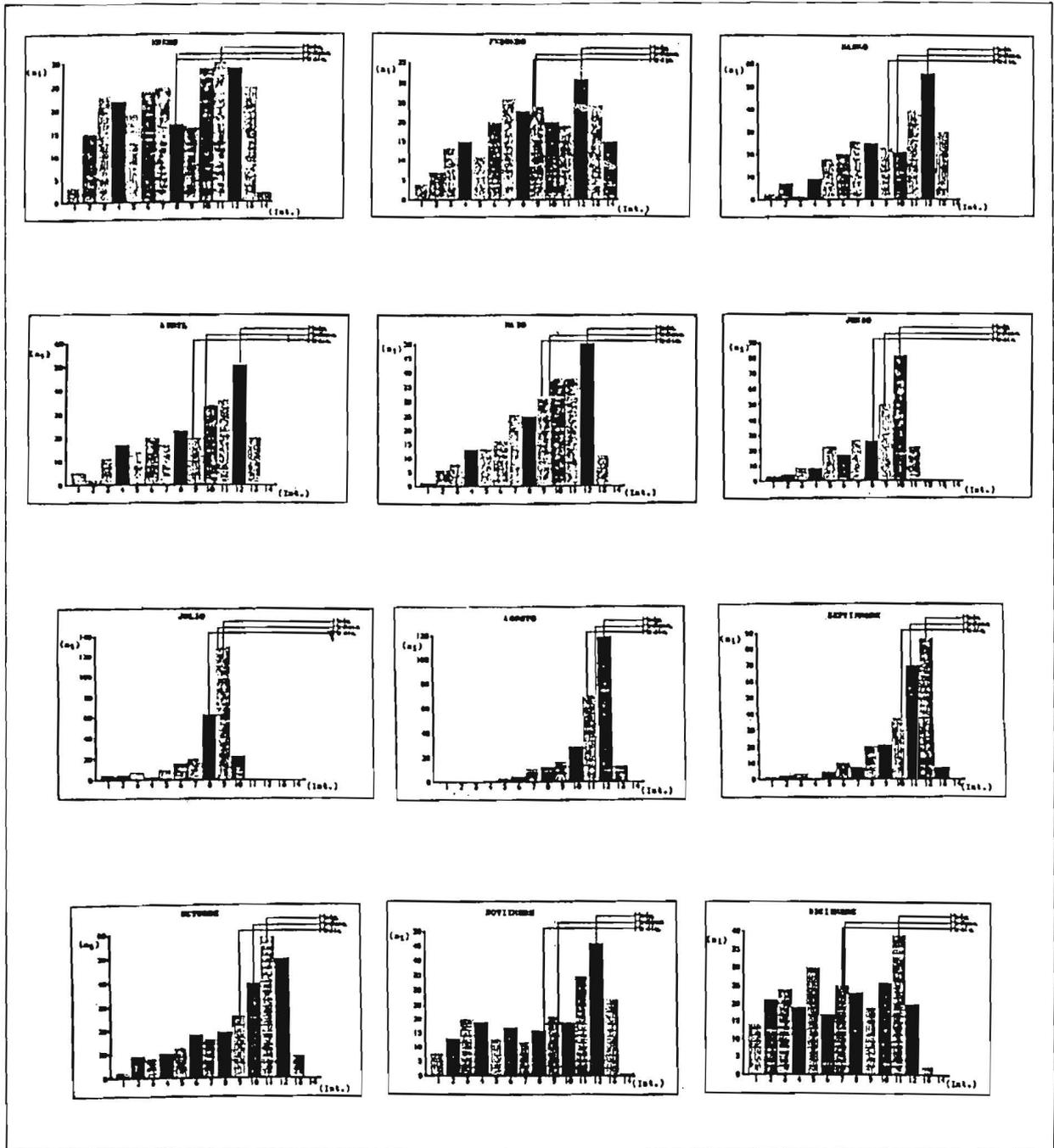


Gráfico 1.—Distribución mensual de frecuencias ( $n_i$ ), con expresión de los intervalos (Int.) de moda, media y mediana

Hemos de hacer anotar que el período elegido para la obtención del índice a largo plazo está condicionado por la carencia de períodos de observaciones lo suficientemente amplios en el tiempo, y ello hace que los valores de  $K$  deducidos tengan una mayor incidencia cualitativa que cuantitativa.

Asimismo, los resultados deberán ser mejorados a medida que se pueda contar con mayor

cantidad de registros y, por lo tanto, de valores estadísticamente más perfectos del índice de claridad a largo plazo.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos al aplicar la ecuación (1) a los datos empleados.

Se observa cómo los coeficientes de correlación correspondientes a períodos de uno y cinco

**TABLA 3**  
**COEFICIENTES DE REGRESION Y CORRELACION, OBTENIDOS PARA LA**  
**ECUACION (1) EN SALAMANCA, EN FUNCION DEL NUMERO DE DIAS**  
**CONSECUTIVOS TOMADOS**

N.º días	Coeficientes de regresión				Coeficientes de correlación			
	Constantes	Error estimado	T de Student	Probab. > t	r	Variac. explicada (%)	Estad. F	Probab. F
1	a=0,982	0,050	19,718	0,000	0,340	11,6	388,797	0,000
	b=1,082	2,685	0,403	0,690				
5	a=0,755	0,166	4,541	0,000	0,404	16,3	20,625	0,000
	b=0,142	0,088	1,613	0,106				
15	a=0,948	0,060	0,595	0,000	0,629	39,6	69,504	0,000
	b=0,036	0,114	8,337	0,560				
25	a=1,007	0,092	10,888	0,000	0,727	52,8	118,538	0,000
	b=0,001	0,049	-0,022	0,981				

días de radiación acumulada no son excesivamente altos (0,340 y 0,404), lo que indica que la probabilidad de que haya uno o cinco días consecutivos tales que la radiación recibida y acumulada pueda ser explicada mediante el empleo de la ecuación propuesta sólo es de 11,6 y 16,3 %, respectivamente.

A medida que incrementamos el número de días de radiación acumulada se aprecia como aumentan elocuentemente los coeficientes de correlación (0,629 y 0,721) y, por lo tanto, la explicación del proceso.

Todo ello hace suponer que si elegimos un intervalo de 25 días consecutivos, la probabilidad de que el total de radiación solar recibida en Salamanca, en esa época, que puede ser calculada mediante los valores promedios empleados en la ecuación (1), es del 52,8 %.

Aunque a primera vista los resultados no parezcan excesivamente brillantes, la importancia de conocer con precisión la cantidad de radiación solar acumulada para un cierto número de días es básica en el diseño de los sistemas de colectores de energía solar empleados en la actualidad. El almacenaje de esta energía depende primordialmente de dos parámetros: el área del colector empleado  $A$  (m<sup>2</sup>) y su capacidad de al-

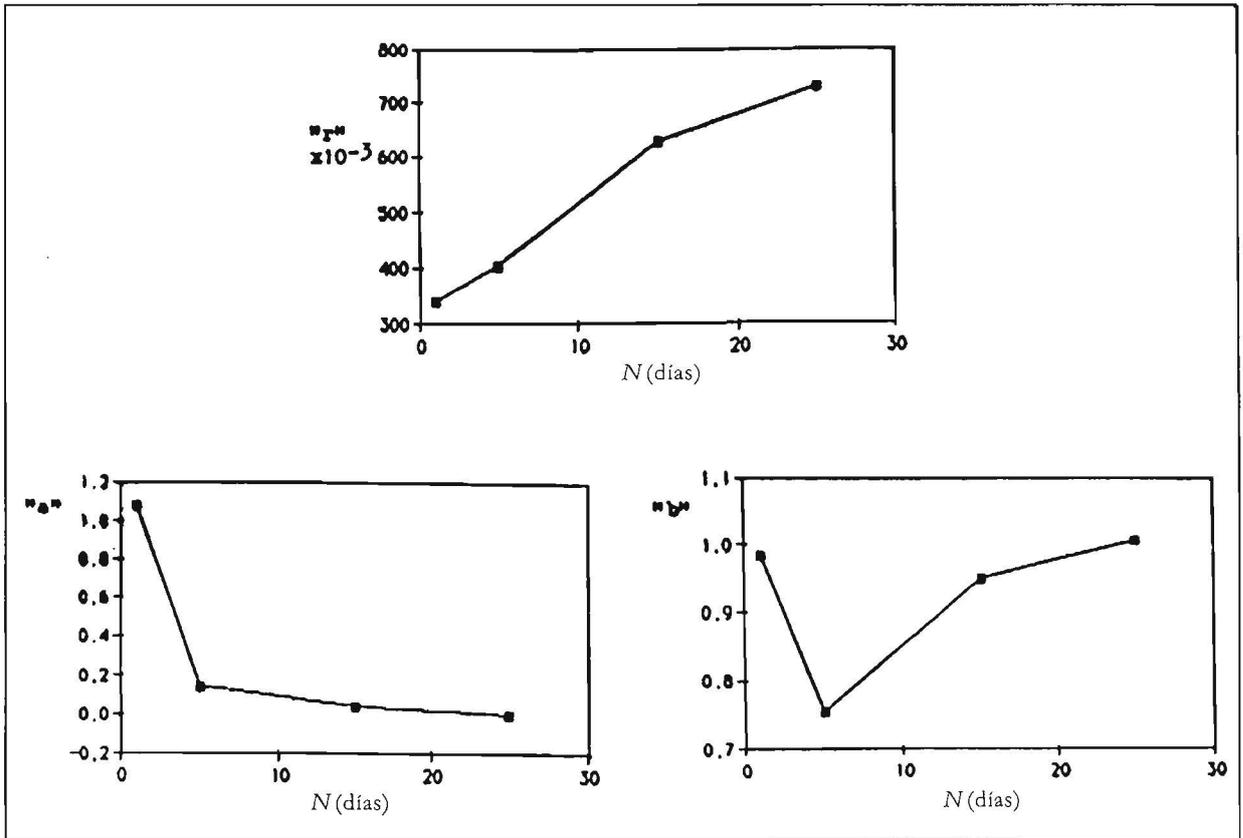
macenamiento  $S$  (kWh), por lo que conocida la acumulación potencial posible para un cierto número de días, puede reducirse la superficie del colector a emplear, optimizando de esta manera la instalación.

En la gráfica 2 se presenta la variación de los coeficientes de correlación ( $r$ ) y de los coeficientes de la regresión ( $a$  y  $b$ ), respecto del número de días considerados, observando la tendencia de estos parámetros que caracterizan la tendencia de la ecuación propuesta.

### Conclusiones

Se han obtenido las distribuciones mensuales de frecuencias del índice de claridad o transparencia ( $K$ ), definido como el cociente entre la radiación solar global diaria ( $G$ ) y la radiación solar máxima recibida en el límite de la atmósfera ( $H_0$ ) para Salamanca.

Además, partiendo de un índice de claridad a largo plazo ( $\bar{K}$ ), basado en un período amplio de observaciones, se ha propuesto una expresión que relaciona este valor con el correspondiente índice de claridad diario para los distintos períodos considerados (1, 5, 15 y 25 días). Los resultados, si bien pueden ser mejorables, dan una idea de cómo el método puede ser adecuado para



Gráfica 2.—Variación de los coeficientes de correlación ( $r$ ) y de los coeficientes de la regresión ( $a$  y  $b$ ), respecto del número de días tomados

el diseño de instalaciones basadas en procedimientos de acumulación de energía solar.

### Bibliografía

ROBINSON, N. (1966): *Solar radiation*. Elsevier, Pub. Co., Londres.

KONDRATYEV, Y. K. (1969): *Radiation in the atmosphere*. Academic Press, Nueva York.

LIU, B. y JORDAN, R. C. (1960): «The interrelationships and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation», *Solar Energy*, 4, pp. 1-9.

BIGA, A. J. y ROSA, R. (1979): «Contribution to study of the solar radiation climate of Lisbon», *Solar Energy*, 23, pp. 61-67.