

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO DE ANGSTRÖM-PAGE PARA LA PROVINCIA DE PANAMÁ

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

*ESPINOSA, JORGE A.; GUERRA, SERGIO; PINO, ALFONSO; SÁNCHEZ, NÉSTOR.

ABSTRACT

In this paper, we present the results of the analysis of the data of global solar radiation, collected by the meteorology section of the Panama Canal Commission, in the years between 1985 and 1995 at the Balboa FAA station, located on the Pacific coast, at the entrance of the Panama Canal, and sunshine data collected at the Tocumen Station by the Department of Hydrometeorology of the Institute of Hydraulics Resources and Electrification (IRHE). Based on this information, it has been possible to determine the relative solar radiation and the relative sunshine level, which are related in a linear form by the Angström-Page model. This made possible the calculation of the coefficients **a** and **b** for this model applied to the Panama province, during the period from 1985 to 1995. The mean values of **a** and **b** corresponding to the highest correlation coefficients are 0.29 and 0.40, respectively.

It was also possible to compute the monthly clearness index for the years between 1985 and 1995, information that will be of importance for future computations.

RESUMEN

En este trabajo, se presentan los resultados del análisis de la data de radiación solar global colectada

por la sección de meteorología de la Comisión del Canal, en el período comprendido entre 1985 y 1995 en la estación de Balboa FAA, situada en la costa del Pacífico, a la entrada del Canal de Panamá y data de brillo solar, colectada en la estación de Tocumen, por el Departamento de Hidrometeorología del Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE). En base a esta información se han podido determinar la radiación solar relativa y el brillo solar relativo, los cuales están relacionados en forma lineal en el modelo Angström-Page. Esto ha permitido determinar el valor de los coeficientes **a** y **b** para este modelo, aplicado a la Provincia de Panamá durante el período de 1985 a 1995. Los valores medios correspondientes a los más altos coeficientes de correlación son 0.29 y 0.40, respectivamente.

En este trabajo también fue posible determinar el índice de claridad mensual del cielo para cada año entre 1985 y 1995, información importante que más adelante se utilizará para realizar futuros cálculos.

* Meteorólogo (Sección de Meteorología de la Comisión del Canal de Panamá)

Introducción

El Grupo de Física de la Atmósfera del Departamento de Física de la Universidad de Panamá, se encuentra en proceso de implementación de una

investigación cuyo objetivo general es la caracterización de los niveles tanto de radiación UVB (280-320 nm) como de radiación global en Panamá, de forma tal que se pueda estudiar la evolución de dichos niveles a lo largo de cada año. Los objetivos específicos de dicha investigación son los siguientes:

1. Estudiar la disponibilidad de energía solar en nuestro país, (para el estudio de paneles solares, celdas fotovoltaicas, etc.)
2. Elaborar un modelo matemático que permita correlacionar la irradiancia ultravioleta B con parámetros atmosféricos y meteorológicos.
3. Investigar la relación existente entre la dosis de radiación UVB que se registran a nivel local y fenómenos fotobiológicos (daños en el DNA, interferencia en el mecanismo de fotosíntesis, cánceres de piel, etc.).
4. Predecir el valor de la columna de Ozono estratosférico a partir de los niveles de irradiancia UVB registrados.

El presente artículo aborda el problema concerniente a la disponibilidad de energía solar en Panamá. Dicha disponibilidad en un lugar dado es función de los parámetros siguientes:

- a) La irradiancia global promedio (incrustar Equation.2).
- b) El brillo solar promedio (incrustar Equation.2).

La banda de longitud de onda correspondiente a la radiación solar recibida en la superficie terrestre, se encuentra comprendida, aproximadamente, entre 2×10^{-7} m y 4×10^{-6} m (200 nm a 4000 nm).

En una superficie horizontal inciden tanto la radiación solar directa como la radiación difusa. La suma de ambas constituyen la radiación global (H_g). Cabe señalar que el brillo solar, N_i , se define como el número de horas durante las cuales el sol se encuentra sobre el horizonte y su energía es capaz de quemar la cinta de un heliógrafo. Este parámetro se mide en horas/día.

Para el estudio de la disponibilidad de energía solar en el área de la provincia de Panamá, se empleó

el Modelo de Angström-Page, el cual establece que la radiación solar relativa es una función lineal del brillo relativo. Dicha función puede ser planteada de la manera siguiente:

$$\frac{\overline{H_g}}{\overline{H_o}} = a + b\left(\frac{\overline{N_o}}{\overline{N_d}}\right) \quad (1)$$

donde H_o es la radiación solar extraterrestre promedio, sobre una superficie horizontal, mientras que $\overline{N_d}$ es el promedio de la duración astronómica del día. La ecuación anterior también podría plantearse en términos de la irradiancia relativa en la forma siguiente:

$$\frac{\overline{I_g}}{\overline{I_o}} = a + b\left(\frac{\overline{N_i}}{\overline{N_d}}\right) \quad (2)$$

Donde $\overline{I_o}$ es la irradiancia promedio extraterrestre en superficie horizontal.

El objetivo del presente estudio consiste en la determinación de los coeficientes "a" y "b" locales correspondientes al modelo de Angström-Page. La información de irradiancia analizada en el presente trabajo corresponde a una de las estaciones meteorológicas que maneja el Departamento de Meteorología e Hidrografía de la Comisión del Canal de Panamá (CCP). Dicha información, que abarca el período comprendido de 1985 a 1995, fue obtenida en la estación de Balboa FAA. El clima para la estación de Balboa FAA, está dominado primordialmente por una temporada seca que va desde mediados de diciembre a finales de abril y una temporada lluviosa entre mayo y mediados de diciembre, siendo los meses de octubre y noviembre los más lluviosos.

Según la clasificación de Koeppen (Critchfield, H., 1974), las estaciones de Balboa y Tocumen tienen un clima tropical de sabana (Aw); el cual se caracteriza por tener una precipitación anual menor que 2500 mm; una estación seca prolongada (meses

con lluvia menor de 60 mm) en el invierno del hemisferio norte; temperatura media del mes más fresco superior a 18° C y con una diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el mes más fresco inferior a los 5° C. (Instituto Geográfico Nal., 1988)

La información de brillo solar analizada corresponde a la estación meteorológica ubicada en Tocumen, Panamá, para el mismo período 1985 - 1995. Dicha estación es operada por el Departamenteo de Hidrometeorología del Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE). Tanto la estación meteorológica de Balboa FAA como la de Tocumen poseen el mismo tipo de clima (Awi) según la clasificación de Koeppen, (Instituto Geográfico "Tommy Guardia", 1988).

Para la evaluación de los coeficientes de regresión del modelo de Angström-Page, se requieren cuatro parámetros a saber:

$\overline{I_g}$ = irradiancia global promedio medida

$\overline{I_o}$ = irradiancia extraterrestre en superficie horizontal

$\overline{N_i}$ = brillo solar promedio

$\overline{N_d}$ = promedio de la duración astronómica del día (Ver Tabla No. 1)

De estos cuatro parámetros dos fueron medidos directamente: $\overline{I_g}$ y $\overline{N_i}$. Los otros dos, $\overline{I_o}$ y $\overline{N_d}$, fueron evaluados mediante las ecuaciones que han sido deducidas para tal efecto.

Determinación de la Duración Astronómica del Día

La duración astronómica del día, que se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre la salida y la puesta del sol, se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$N_d = \frac{2}{15} W_{ss} = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (3)$$

Definición de parámetros astronómicos requeridos:

W_{ss} = ángulo con que se oculta el sol

δ = declinación solar

ϕ = latitud del lugar de observación

La declinación solar δ , es el ángulo entre la posición del sol y el plano ecuatorial celeste (proyección del plano ecuatorial terrestre) cuando dicho astro pasa por el meridiano astronómico del lugar (mediodía verdadero). El máximo valor de δ corresponde a +23.45° en el solsticio de verano (21 de junio), mientras que su valor mínimo corresponde a -23.45° en el solsticio de invierno (21 de diciembre). La declinación pasa por 0° en los equinoccios de primavera y otoño.

Una expresión razonable para δ es la siguiente (Madronich, S., 1993)

$$\delta = b_0 + b_1 \cos \theta_n + b_2 \sin \theta_n + b_3 \cos 2\theta_n + b_4 \sin 2\theta_n + b_5 \cos 3\theta_n + b_6 \sin 3\theta_n \quad (4)$$

donde θ_n es el ángulo asociado al día del año y se determina mediante la relación siguiente:

$$\theta_n = 2\pi d_n / 365 \quad (5)$$

(en donde el 1 de enero = 0 y 31 de diciembre = 364)

Los valores de las constantes b_i se muestran en la Tabla 1a.

TABLA No.1

Días	DURACIÓN ASTRONÓMICA DEL DÍA EN HORAS											Estación:	Balboa
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1	11.49	11.63	11.84	12.10	12.33	12.49	12.51	12.39	12.17	11.93	11.69	11.52	
2	11.49	11.64	11.85	12.11	12.33	12.49	12.51	12.39	12.17	11.92	11.68	11.51	
3	11.49	11.64	11.86	12.11	12.34	12.50	12.51	12.38	12.16	11.92	11.67	11.51	
4	11.50	11.65	11.87	12.12	12.35	12.50	12.51	12.37	12.15	11.91	11.67	11.51	
5	11.50	11.66	11.87	12.13	12.35	12.50	12.51	12.37	12.14	11.90	11.66	11.50	
6	11.50	11.66	11.88	12.14	12.36	12.50	12.50	12.36	12.13	11.89	11.65	11.50	
7	11.50	11.67	11.89	12.15	12.37	12.51	12.50	12.35	12.13	11.88	11.65	11.50	
8	11.51	11.68	11.90	12.15	12.37	12.51	12.50	12.35	12.12	11.87	11.64	11.49	
9	11.51	11.69	11.91	12.16	12.38	12.51	12.50	12.34	12.11	11.87	11.63	11.49	
10	11.51	11.69	11.92	12.17	12.38	12.51	12.49	12.33	12.10	11.86	11.63	11.49	
11	11.52	11.70	11.92	12.18	12.39	12.51	12.49	12.33	12.09	11.85	11.62	11.49	
12	11.52	11.71	11.93	12.19	12.40	12.52	12.49	12.32	12.09	11.84	11.61	11.49	
13	11.53	11.72	11.94	12.19	12.40	12.52	12.48	12.31	12.08	11.83	11.61	11.48	
14	11.53	11.72	11.95	12.20	12.41	12.52	12.48	12.31	12.07	11.83	11.60	11.48	
15	11.53	11.73	11.96	12.21	12.41	12.52	12.48	12.30	12.06	11.82	11.60	11.48	
16	11.54	11.74	11.97	12.22	12.42	12.52	12.47	12.29	12.05	11.81	11.59	11.48	
17	11.54	11.75	11.97	12.22	12.42	12.52	12.47	12.29	12.05	11.80	11.58	11.48	
18	11.55	11.75	11.98	12.23	12.43	12.52	12.46	12.28	12.04	11.79	11.58	11.48	
19	11.55	11.76	11.99	12.24	12.43	12.52	12.46	12.27	12.03	11.79	11.57	11.48	
20	11.56	11.77	12.00	12.25	12.44	12.52	12.45	12.26	12.02	11.78	11.57	11.48	
21	11.56	11.78	12.01	12.25	12.44	12.52	12.45	12.26	12.01	11.77	11.56	11.48	
22	11.57	11.78	12.02	12.26	12.45	12.52	12.44	12.25	12.01	11.76	11.56	11.48	
23	11.58	11.79	12.02	12.27	12.45	12.52	12.44	12.24	12.00	11.76	11.55	11.48	
24	11.58	11.80	12.03	12.28	12.46	12.52	12.44	12.24	11.99	11.75	11.55	11.48	
25	11.59	11.81	12.04	12.28	12.46	12.52	12.43	12.23	11.98	11.74	11.54	11.48	
26	11.59	11.82	12.05	12.29	12.47	12.52	12.42	12.22	11.97	11.73	11.54	11.48	
27	11.60	11.83	12.06	12.30	12.47	12.52	12.42	12.21	11.96	11.72	11.53	11.48	
28	11.60	11.83	12.06	12.31	12.48	12.52	12.41	12.20	11.96	11.72	11.53	11.48	
29	11.61		12.07	12.31	12.48	12.52	12.41	12.20	11.95	11.71	11.52	11.48	
30	11.62		12.08	12.32	12.48	12.52	12.40	12.19	11.94	11.70	11.52	11.48	
31	11.62		12.09		12.49		12.40	12.18		11.70		11.49	
PROM.	11.55	11.73	11.97	12.21	12.41	12.51	12.47	12.29	12.06	11.81	11.6	11.49	

TABLA No. 1a
 Coeficientes para el cálculo de la declinación solar (b_i)^a

i	b_i
0	0.006918
1	-0.399912
2	0.070257
3	-0.006758
4	0.000907
5	-0.0002697
6	0.001480

^a Valores tomados de Spencer (1971)

Determinación de la Irradiancia Extraterrestre en Superficie Horizontal

Tal como se indicó anteriormente, el otro parámetro que debió ser evaluado es la irradiancia extraterrestre total diaria en superficie horizontal. El valor de este parámetro es de suma importancia en todo modelo de radiación solar. Si I_b corresponde a la irradiancia local extraterrestre instantánea, H_o a la radiación o flujo extraterrestre total diario, se tiene que:

$$H_o = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} I_{bn}(t) dt \tag{6}$$

donde: $I_{bn} = I_b \cos\theta$, siendo θ el ángulo de zenith solar.

Por consiguiente:

$$H_o = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} I_b(t) \cos\theta dt \tag{7}$$

es posible también emplear el ángulo de altura solar α que es el complementario de θ . En tal caso la integral anterior quedaría expresada como:

$$H_o = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} I_b(t) \text{sen}\alpha dt \tag{8}$$

H_o es el flujo solar global, en superficie horizontal evaluado fuera de la atmósfera terrestre, en un intervalo de tiempo Δt . Dicho flujo fue evaluado para un tiempo correspondiente a un día solar N_d . Por otro lado, el valor de $I_b(t)$ fuera de la atmósfera terrestre varía con la excentricidad de la órbita que sigue el planeta tierra en torno al sol.

Se tiene:

$$I_b(t) = e(\theta_n) I_{sc} \tag{9}$$

donde I_{sc} es la constante solar y $e(\theta_n)$ es el factor de excentricidad. Dicho factor está dado por la siguiente expresión:

$$e(\theta_n) = 1 + 0.034 \cos \theta_n \tag{10}$$

En consecuencia, el integral planteado anteriormente, queda expresado de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} H_o &= \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} I_{sc} e(\theta_n) \text{sen}\alpha dt \\ &= I_{sc} e(\theta_n) \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} \text{sen}\alpha dt \end{aligned} \tag{11}$$

Al integrar con respecto a ω , el integral anterior queda expresado así:

$$\begin{aligned} H_o &= e(\theta_n) \left(\frac{180}{\pi}\right) I_{sc} \int_{\omega}^{\omega+\omega_n} (\cos\delta \cos\phi \cos\omega + \text{sen}\delta \text{sen}\phi) d\omega \\ &= \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} (1 + 0.034 \cos\theta_n) (\cos\delta \cos\phi \text{sen}\omega_n + \omega_n \text{sen}\delta \text{sen}\phi) \end{aligned} \tag{12}$$

El flujo H_o se encuentra expresado en $\frac{\text{watt} \cdot \text{hr}}{m^2}$

El valor de la constante solar I_{sc} con el que se ha trabajado es :

$$I_{sc} = (1372 \pm 2) \frac{\text{watt}}{m^2}$$

que corresponde a la medición directa efectuada por el satélite Nimbus 7 entre 1978 y 1991 (Hoyt et al., 1992).

La irradiancia extraterrestre es el flujo extraterrestre por unidad de tiempo. Como el intervalo de tiempo considerado es $\Delta t = 1$ día (24 h), la expresión para I_0 es de la forma:

$$[I_0] = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \left(\frac{1}{24}\right)\left(\frac{\text{watt}}{\text{m}^2}\right)[H_0]$$

Esta expresión fue utilizada para calcular la irradiancia extraterrestre en superficie horizontal correspondiente a cada día del año en la estación de Balboa FAA. Para tal efecto se elaboró un programa en Basic. De esta información se obtuvo la irradiancia extraterrestre promedio diaria, correspondiente a cada mes del año. En la Tabla No. 2 se muestran los valores de dicho parámetro en Langley/día.

TABLA No.2

IRRADIANCIA EXTRATERRESTRE EN SUPERFICIE HORIZONTAL
(Langleys/día)

Estación: Balboa

Días	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Juño	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	766.28	816.83	876.18	913.04	910.08	890.08	883.37	895.82	904.28	882.85	827.40	773.72
2	767.13	819.01	878.01	913.50	909.53	889.53	883.52	896.33	904.13	881.51	825.34	772.51
3	768.04	821.20	879.79	913.91	908.95	889.00	883.71	896.83	903.95	880.13	823.28	771.36
4	769.02	823.40	881.54	914.28	908.36	888.48	883.91	897.33	903.73	878.71	821.22	770.26
5	770.07	825.61	883.25	914.61	907.76	887.99	884.13	897.82	903.48	877.25	819.17	769.23
6	771.17	827.83	884.93	914.89	907.14	887.52	884.38	898.30	903.19	875.76	817.13	768.25
7	772.34	830.05	886.56	915.13	906.51	887.06	884.65	898.78	902.86	874.23	815.09	767.33
8	773.57	832.27	888.15	915.33	905.86	886.63	884.94	899.24	902.49	872.67	813.06	766.48
9	774.85	834.50	889.71	915.49	905.21	886.22	885.25	899.69	902.09	871.07	811.05	765.69
10	776.20	836.72	891.22	915.60	904.54	885.83	885.58	900.12	901.64	869.44	809.05	764.96
11	777.59	838.93	892.69	915.68	903.87	885.47	885.92	900.55	901.16	867.77	807.06	764.30
12	779.05	841.15	894.12	915.71	903.19	885.12	886.29	900.95	900.63	866.07	805.10	763.70
13	780.55	843.35	895.50	915.71	902.51	884.81	886.67	901.34	900.07	864.35	803.15	763.17
14	782.11	845.55	896.84	915.67	901.82	884.51	887.06	901.72	899.46	862.59	801.23	762.71
15	783.71	847.73	898.13	915.59	901.13	884.24	887.47	902.07	898.82	860.81	799.33	762.32
16	785.37	849.90	899.38	915.48	900.44	884.00	887.90	902.40	898.13	859.00	797.45	761.99
17	787.07	852.06	900.58	915.33	899.75	883.78	888.34	902.72	897.40	857.16	795.60	761.73
18	788.81	854.20	901.74	915.14	899.05	883.58	888.79	903.01	896.63	855.29	793.79	761.55
19	790.60	856.32	902.85	914.93	898.36	883.41	889.25	903.28	895.82	853.41	792.00	761.43
20	792.43	858.42	903.91	914.67	897.68	883.27	889.73	903.52	894.96	851.50	790.25	761.38
21	794.30	860.50	904.93	914.39	896.99	883.15	890.21	903.75	894.07	849.57	788.53	761.41
22	796.20	862.56	905.90	914.08	896.31	883.06	890.70	903.94	893.13	847.62	786.85	761.50
23	798.14	864.59	906.83	913.74	895.64	882.99	891.20	904.11	892.15	845.65	785.21	761.67
24	800.11	866.60	907.70	913.37	894.98	882.95	891.70	904.25	891.13	843.67	783.62	761.90
25	802.11	868.57	908.53	912.97	894.33	882.93	892.21	904.36	890.07	841.67	782.06	762.21
26	804.15	870.52	909.32	912.55	893.68	882.94	892.72	904.44	888.97	839.66	780.55	762.58
27	806.20	872.44	910.05	912.10	893.05	882.98	893.24	904.50	887.82	837.63	779.08	763.03
28	808.29	874.33	910.74	911.63	892.43	883.04	893.75	904.52	886.64	835.60	777.67	763.54
29	810.40		911.38	911.14	891.82	883.12	894.27	904.51	885.42	833.56	776.30	764.12
30	812.52		911.98	910.62	891.22	883.23	894.79	904.46	884.15	831.51	774.98	764.77
31	814.67		912.53		890.64		895.31	904.39		829.45		765.49
PROMED.	787.19	846.26	897.58	914.21	900.41	885.03	888.42	901.58	896.95	857.97	799.39	764.72

Instrumentación

Tal como fue señalado anteriormente, para el presente estudio se utilizó la información correspondiente a irradiancia global recopilada por el Departamento de Meteorología e Hidrografía de la CCP en la estación de Balboa FAA, así como también,

la información de brillo solar colectada por el Departamento de Hidrometeorología del IRHE en la estación de Tocumen. La Tabla No. 4 muestra la localización geográfica y elevación en metros sobre el nivel medio del mar (msnmm) de cada una de las estaciones.

TABLA No. 4

Localización geográfica y elevación de las estaciones meteorológicas

Estación	Latitud	Longitud	Elevación
Balboa FAA	8° 58' N	79° 33' W	10 msnmm
Tocumen	9° 03' N	79° 22' W	20 msnmm

La estación de Balboa FAA está equipada con un piranómetro Modelo No. 100507 fabricado por la Compañía Matrix, Inc., instalado horizontalmente para medir la radiación global. La respuesta espectral del instrumento está entre 350 nm y 1150 nm con sensibilidad pico aproximadamente a los 850 nm, con una precisión de campo de $\pm 5\%$. La información colectada por el piranómetro se almacena en la memoria de un sistema de adquisición de datos automático programado para recibir información cada diez segundos. Dicha información es procesada y el total para cada hora es guardado.

Resultados

La Tabla No. 3 muestra los valores de brillo solar medio \bar{N}_i , para la estación de Tocumen para el período 1985 - 1995 (exceptuando los años 90 y 91 para los cuales no hay información). Uno de los objetivos de este trabajo es la determinación de los coeficientes **a** y **b** del modelo de Angström-Page, el cual exige información de brillo solar medio e

irradiancia para la misma localidad. Como la estación de Balboa sólo mide irradiancia global, se decidió utilizar la información de brillo solar de la estación de Tocumen que es la estación más cercana a la de Balboa FAA, a una distancia aproximada de 11 km de ésta, con características climáticas similares y poca diferencia en elevación (Ver Tabla No. 4).

El análisis de la información de irradiancia relativa versus brillo solar relativo (Ver Tabla No. 4A a Tabla No. 4E) demuestra una tendencia de tipo lineal como indica la literatura (Kreith y Kreider, 1978). La información de las Tablas 4A a 4E muestran coeficientes de correlación (r^2) comprendidos entre 0.46 y 0.99. Cinco de los coeficientes, correspondientes a los años 1985, 1986, 1987, 1992 y 1995 son relativamente altos. Los valores promedio de los coeficientes del modelo Angström-Page para toda la información son:

$$a = 0.32 \quad b = 0.34$$

TABLA No.3

BRILLO SOLAR MEDIO DIARIO
(Horas/día)

Estación: Tocumen

Meses	1985	1986	1987	1988	1989	1992	1993	1994	1995
Enero	8.06	7.75	7.68	7.60		7.73	3.01	3.25	8.42
Febrero	7.48	6.09	6.76	7.19	6.60	7.90	8.53	6.74	8.56
Marzo	6.65	7.26	6.07	7.91	7.21	6.09	5.97	6.79	7.85
Abril	7.14	5.47	4.58	6.18	6.02	4.96	5.15	5.97	6.35
Mayo	4.24	5.71	3.84	3.64	3.41	4.82	0.61	4.17	4.11
Junio	2.67	3.36	2.16	3.00	3.01	4.51	3.02	3.45	
Julio	3.12	3.89	1.78	1.32	2.55	3.42	3.57	3.96	
Agosto	3.55	3.21	3.74	3.57		3.51	3.50	3.69	
Septiembre	5.05	3.93	4.24	0.61	1.46	3.31	2.42	3.84	
Octubre	3.12	3.30	3.23	2.78	2.01	3.37	3.93	4.18	
Noviembre	5.47	4.29	5.09		4.20	2.74	4.15	4.24	
Diciembre	6.09		5.83	4.59	1.89	6.75	6.81	7.46	

El modelo de Angström-Page es una herramienta simple y conveniente para la estimación de la radiación global. Sin embargo, su utilidad depende de la confiabilidad de los estimados. Dicha confiabilidad se encuentra determinada por dos indicadores: a) el error estándar de los estimados, el cual está asociado a la ecuación de regresión; b) la consistencia de los coeficientes obtenidos al efectuar regresiones sobre la data procedente de diversos períodos de tiempo. El primer indicador es de fácil obtención en cualquier método estadístico convencional. El segundo indicador, que determina la posibilidad de generalizar la extrapolación del patrón de data sobre diferentes períodos de tiempo, se encuentra dado por altos índices del coeficiente de correlación ($r^2 > 0,80$). Este segundo indicador es de suma importancia y ha sido escasamente estudiado por los investigadores, debido

fundamentalmente a la carencia de data correspondiente a intervalos de tiempo mayores de dos años (Goh, T.N., Tan, K.J., 1978).

En virtud de lo planteado anteriormente, se seleccionaron aquellos años con índices más altos del coeficiente de correlación ($r^2 > 0.8$). Los resultados para este período de cinco años (Ver Tabla No. 6B) son:

$$a = 0.29 \quad b = 0.40$$

Que son los valores que se recomiendan usar para el cálculo de disponibilidad de energía para la provincia de Panamá. Se espera realizar un análisis similar para otras regiones del país en futuros artículos.

La relación entre la radiación difusa y la total se encuentra correlacionada por un parámetro meteorológico denominado índice de claridad mensual

TABLA No. 4C

AÑO 1987		Estación: Balboa		
Meses	Irradiancia Medida (Langleys/día)	Irradiancia Extraterrestre Promedio (Langleys/día)	Brillo solar Relativo	Irradiancia Relativa
Enero	495.07	787.19	0.67	0.63
Febrero	490.54	846.26	0.58	0.58
Marzo	488.43	897.58	0.51	0.54
Abril	419.06	914.21	0.38	0.46
Mayo	402.90	900.41	0.31	0.45
Junio	350.55	885.03	0.17	0.40
Julio	348.68	888.42	0.14	0.39
Agosto	396.71	901.58	0.30	0.44
Septiembre	386.17	896.95	0.35	0.43
Octubre	376.22	857.97	0.27	0.44
Noviembre	372.09	799.39	0.44	0.47
Diciembre	394.68	764.72	0.51	0.52

TABLA No. 4D

AÑO 1992		Estación: Balboa		
Meses	Irradiancia Medida (Langleys/día)	Irradiancia Extraterrestre Promedio (Langleys/día)	Brillo solar Relativo	Irradiancia Relativa
Enero	389.28	787.19	0.67	0.49
Febrero	414.86	846.26	0.67	0.49
Marzo	433.47	897.58	0.51	0.48
Abril	367.84	914.21	0.41	0.40
Mayo	365.95	900.41	0.39	0.41
Junio	351.60	885.03	0.36	0.40
Julio	322.89	888.42	0.27	0.36
Agosto	336.18	901.58	0.29	0.37
Septiembre	301.92	896.95	0.27	0.34
Octubre	305.70	857.97	0.29	0.36
Noviembre	288.47	799.39	0.24	0.36
Diciembre	311.79	764.72	0.59	0.41

TABLA No. 4E

Meses	AÑO 1995		Estación: Balboa	
	Irradiancia Medida (Langleys/día)	Irradiancia Extraterrestre Promedio (Langleys/día)	Brillo solar Relativo	Irradiancia Relativa
Enero	433.46	787.19	0.73	0.55
Febrero	459.53	846.26	0.73	0.54
Marzo	463.44	897.58	0.66	0.52
Abril	425.78	914.21	0.52	0.47
Mayo	357.42	900.41	0.33	0.40
Junio	331.26	885.03		0.37
Julio	304.06	888.42		0.34
Agosto	376.12	901.58		0.42
Septiembre	367.72	896.95		0.41
Octubre	321.04	857.97		0.37
Noviembre	287.20	799.39		0.36
Diciembre	291.73	764.72		0.38

del cielo (Liu y Jordan, 1960), KT , el cual se define como:

$$\overline{KT} = \frac{\overline{H_g}}{\overline{H_o}} = \frac{\overline{I_g}}{\overline{I_o}} \quad (13)$$

En vista que para futuros estudios de la radiación ultravioleta, la “transmitancia” (que se define como la relación entre la radiación directa y la extraterrestre, I_g/I_o) juega un papel importante, se deben realizar evaluaciones de la radiación directa, para lo cual será necesario calcular la radiación difusa, empleando el índice mensual de claridad del cielo antes mencionado. De la Gráfica 4A y la tabla 5A se observan valores altos de índice de claridad del cielo en los meses de enero a abril para el año de 1985 que corresponden a la temporada seca y una depresión en el período de mayo a diciembre. También podemos mencionar que el índice de claridad mensual, promedio, calculado para este año, es de: 0.49 ± 0.02 .

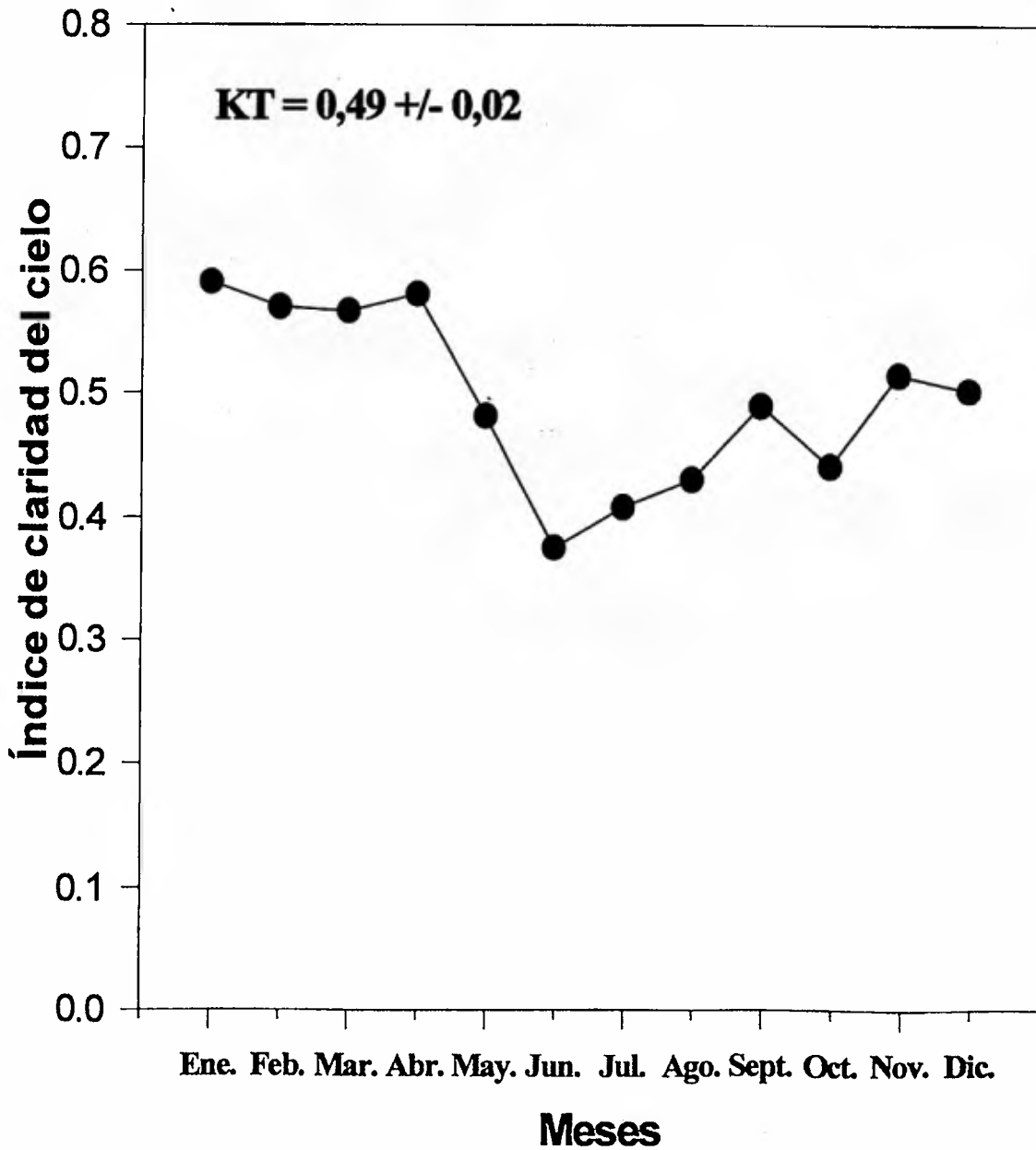
Podemos explicar el comportamiento de este índice por aumentos en la nubosidad y precipitación con la consecuente disminución de días claros en los meses de la estación lluviosa.

TABLA N° 5A
ESTACIÓN: BALBOA 1985

Meses	Índice de Claridad del Cielo
Enero	0.59
Febrero	0.57
Marzo	0.57
Abril	0.58
Mayo	0.48
Junio	0.38
Julio	0.41
Agoosto	0.43
Septiembre	0.49
Octubre	0.44
Noviembre	0.51
Diciembre	0.50

Índice de claridad del cielo vs Tiempo

Balboa 1985



GRÁFICA N° 4A

TABLA No. 6a

COEFICIENTES DE ANGSTROM
PAGE (1985 - 1995)

AÑOS	A	B	Coefficiente de Correlacion
1985	0.31	0.42	0.93
1986	0.29	0.44	0.83
1987	0.31	0.44	0.92
1988	0.38	0.26	0.55
1989	0.40	0.23	0.58
1992	0.28	0.31	0.82
1993	0.33	0.23	0.47
1994	0.28	0.34	0.50
1995	0.27	0.38	0.99
PROMEDIOS	0.32	0.34	
ERROR STD.	0.02	0.03	

TABLA No. 6b

COEFICIENTES DE ANGSTROM- PAGE

AÑOS	A	B	COEF. DE CORRELAC.
1985	0.31	0.42	0.93
1986	0.29	0.44	0.83
1987	0.31	0.44	0.92
1992	0.28	0.31	0.82
1995	0.27	0.38	0.99
PROMEDIOS	0.29	0.4	
ERROR STD.	0.008	0.03	

Conclusiones

Las gráficas de irradiancia relativa vs. brillo relativo muestran un comportamiento lineal, tal como se reporta en la literatura. Los valores promedio de los coeficientes correspondientes al modelo de Angström-Page, se encuentran dentro del rango esperado para las condiciones climáticas y topográficas características de las estaciones meteorológicas de Balboa y Tocumen, tal como reportan Löf et al (Kreith, F. y Kreider, J.F., 1978).

Los coeficientes antes mencionados pueden ser utilizados para calcular la disponibilidad de energía solar a nivel de la provincia de Panamá. Esto implica que si se conoce el brillo solar promedio mensual para dicha provincia, se puede predecir la irradiancia global promedio mensual en superficie horizontal.

Posteriormente, se espera efectuar un análisis similar de la data proveniente de otras regiones del país, a objeto de determinar los coeficientes de la ecuación de regresión correspondientes al modelo de Angström-Page, característicos de las mismas.

Se estudió la evolución del índice mensual de claridad del cielo, correspondiente a la estación de Balboa durante el período comprendido entre enero y diciembre de 1985. Se espera investigar la evolución de dicho índice para otros períodos, a fin de estimar tanto la radiación difusa como la radiación directa en superficie horizontal, a nivel local. De este modo se podrá estimar la transmitancia mensual promedio y estudiar la correlación entre ésta y otros parámetros atmosféricos y meteorológicos.

Irradiancia Relativa vs Brillo Relativo

Balboa 1985

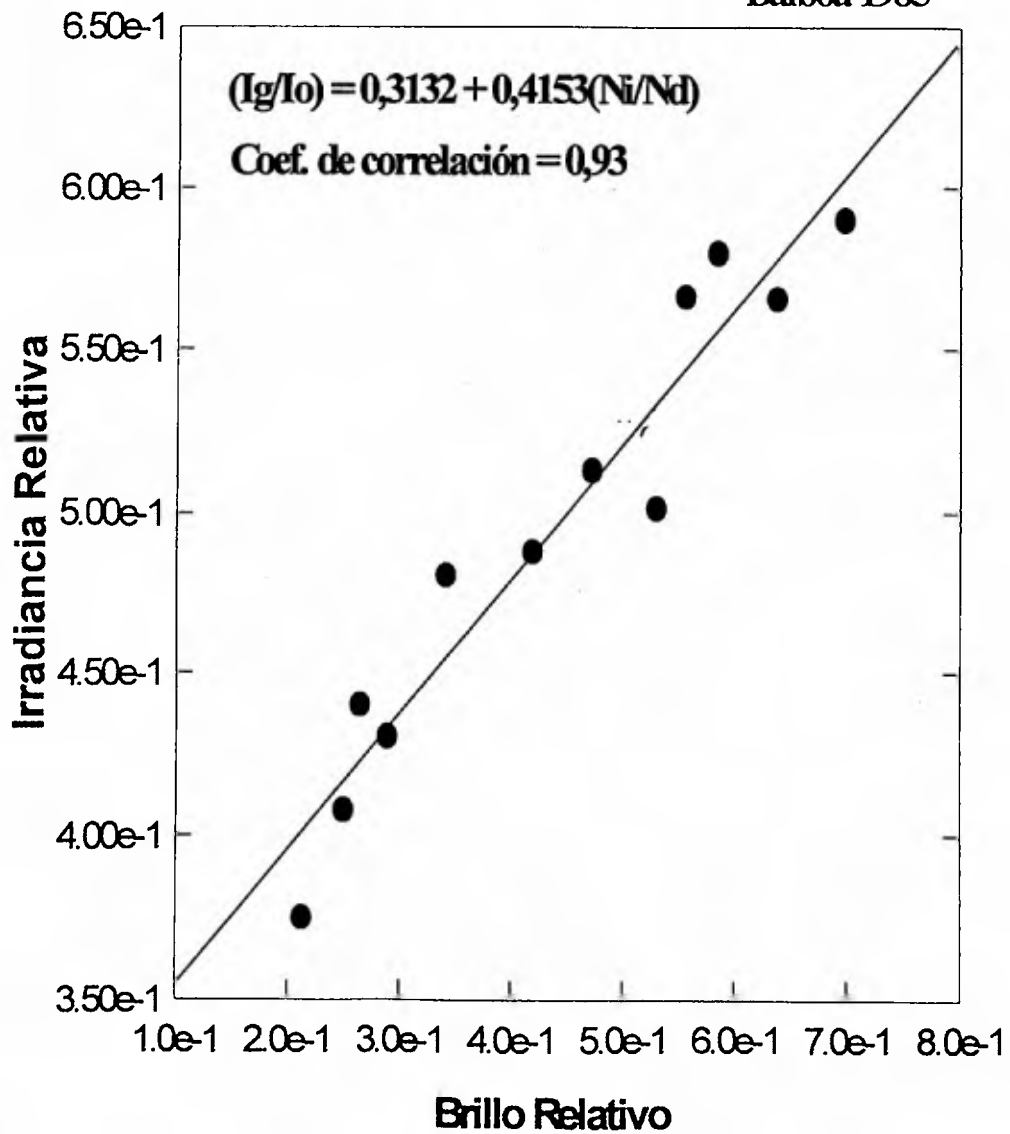


Fig 1A

Irradiancia Relativa vs Brillo Relativo

Balboa 1986

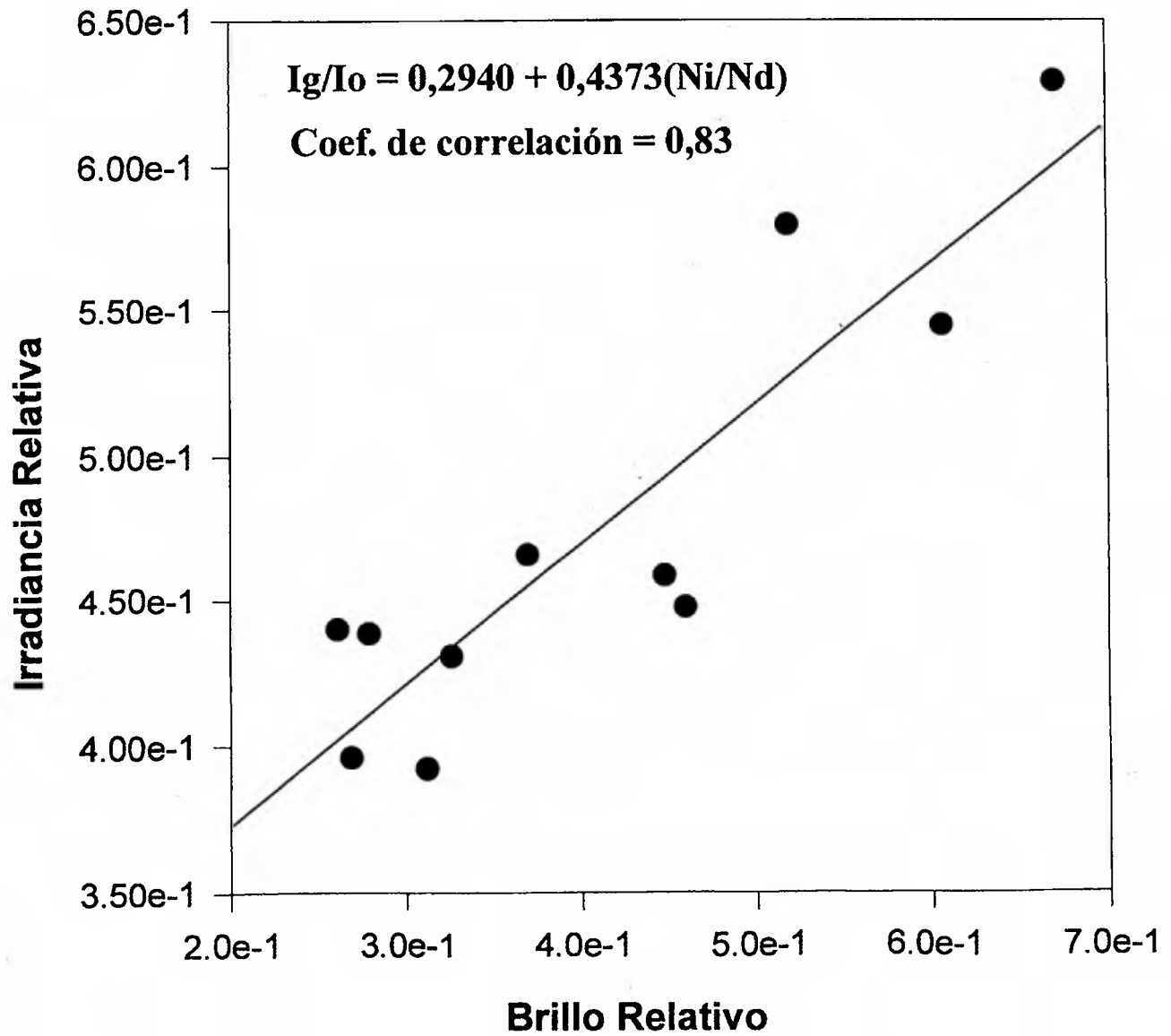


Fig. 1B

Irradiancia Relativa vs Brillo Relativo

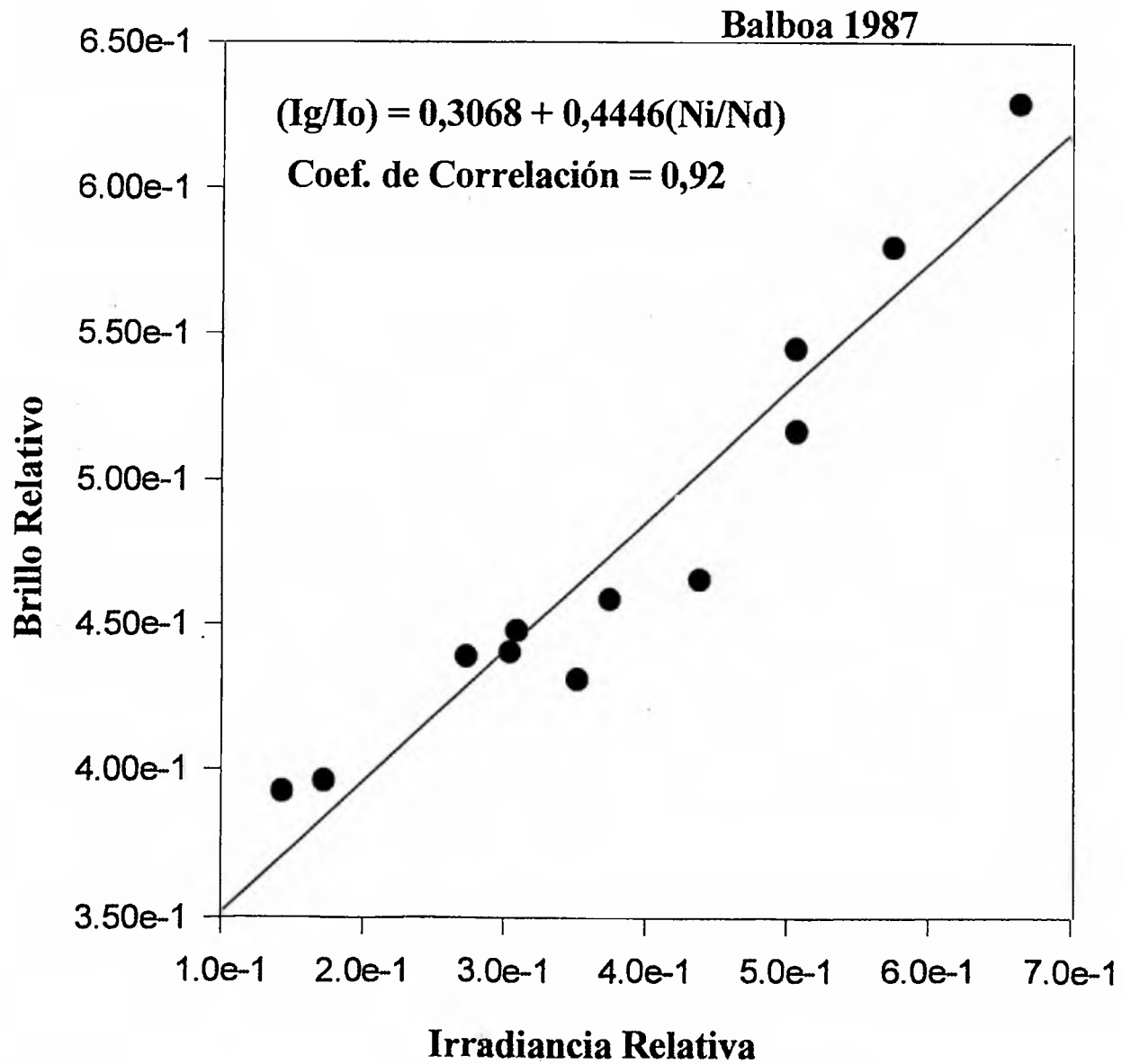


Fig. 1C

Irradiancia Relativa vs Brillo Relativo

Balboa 1992

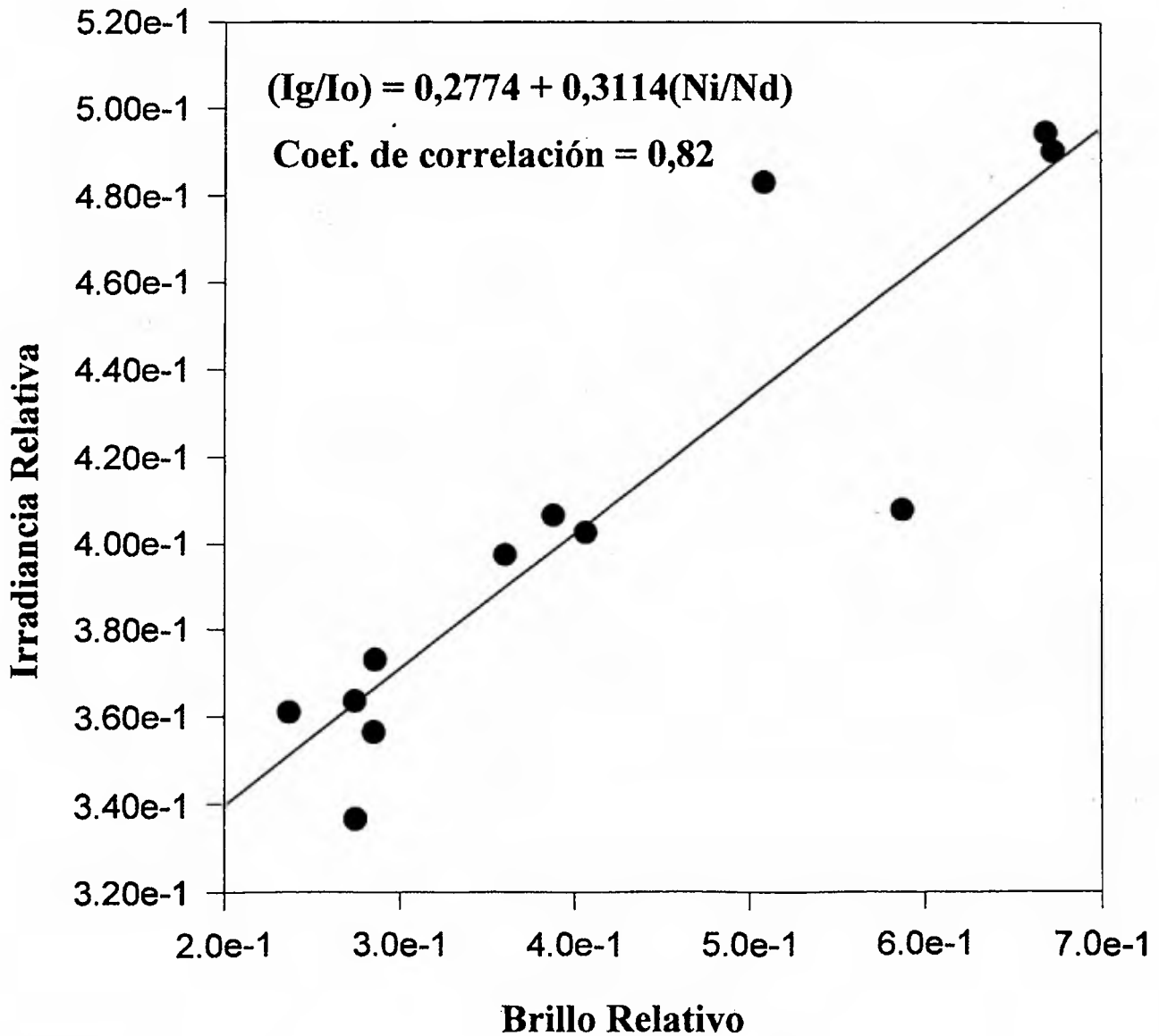
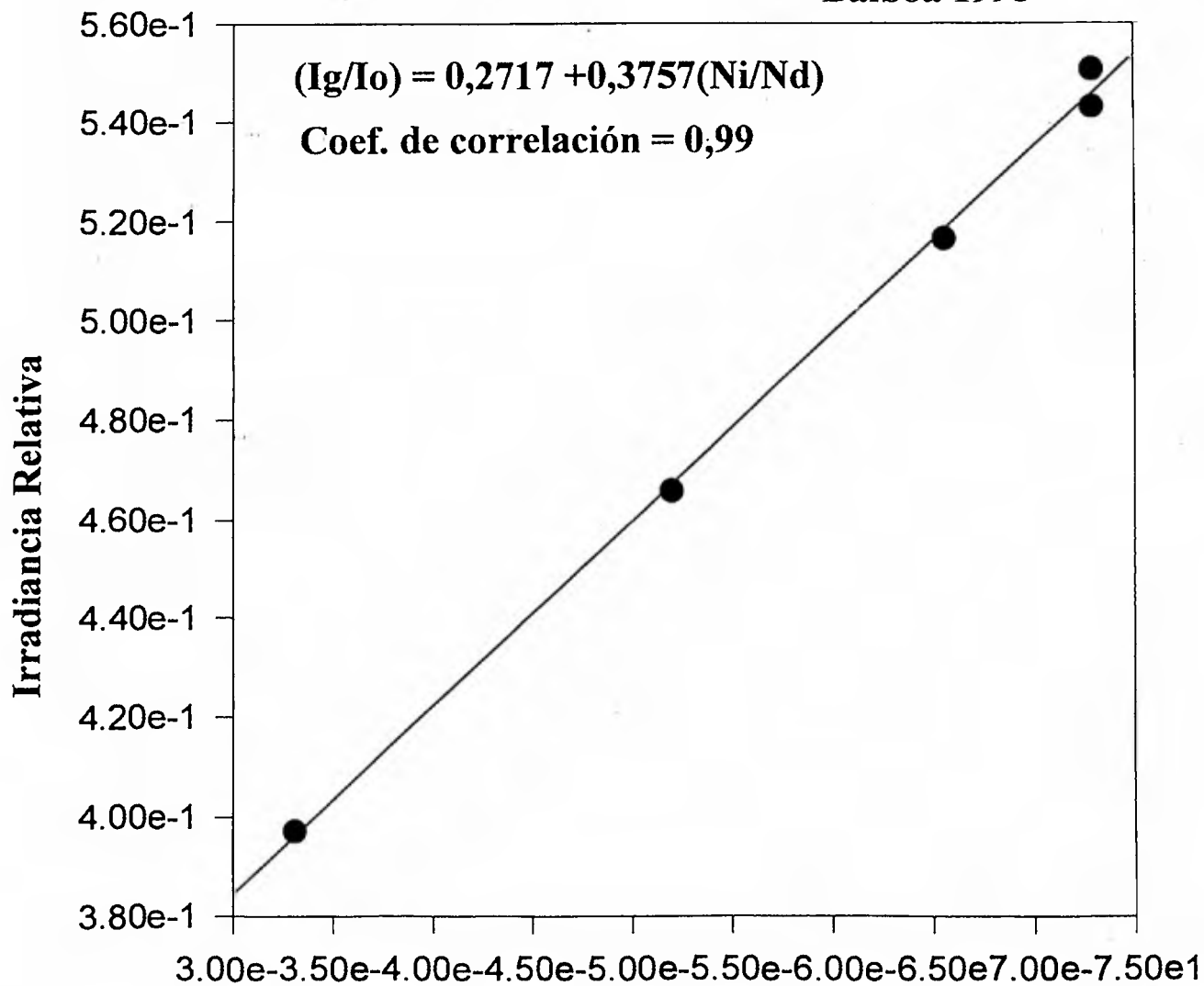


Fig. 1D

Irradiancia Relativa vs Brillo Relativo

Balboa 1995



Brillo Relativo
Fig. 1E

Referencias

1. **CRITCHFIELD, HOWARD J.**, 1974. General Climatology, p. 446. Prentice-Hall International, Inc., London, Third edition.
2. **GOH, T.N., TAN, K.J.**, 1978. Solar Radiation Studies for utilization of Flat-Plate collectors in an Equatorial Region. Proceedings of the International Solar Energy Society Congress, Vol 1, p. 443. Editado por Francis de Winter y Michael Cox.
3. **HOYT, D.V., KYLE, H.L., HICKEY, H.R., y MASCHHOFF, R.H.**, 1992, The Nimbus 7 Solar total irradiance: a new algorithm for its derivation, J. Geophys. Res. 97: 51-63.
4. **ATLAS NACIONAL DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ**, 1988. Panamá, Tercera Edición, Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia".
5. **KREITH, F. y KREIDER, J.F.**, 1978. Principles of Solar Radiation, p. 778. McGraw-Hill, Book Company, New York.
6. **LIU, J.K. y JORDAN, R.C.**, 1960. The inter-relationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, Vol. 4, 1-9.
7. **MADRONICH, S.**, 1993. The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level, tomado de Environmental UV Photobiology, Cap. 1, p. 1-5. Editado por Antony R. Young et al., Plenum Press, New York.
8. **SPENCER, J.W.**, 1971. Fourier series representation of the Sun, Search 2:172.

TABLA No.4A

Meses	AÑO 1985		Estación: Balboa	
	Irradiancia Medida (Langleys/día)	Irradiancia Extraterrestre Promedio (Langleys/día)	Brillo solar Relativo	Irradiancia Relativa
Enero	464.65	787.19	0.70	0.59
Febrero	478.83	846.26	0.64	0.57
Marzo	508.50	897.58	0.56	0.57
Abril	530.32	914.21	0.58	0.58
Mayo	432.94	900.41	0.34	0.48
Junio	332.35	885.03	0.21	0.38
Julio	362.68	888.42	0.25	0.41
Agosto	388.23	901.58	0.29	0.43
Septiembre	437.79	896.95	0.42	0.49
Octubre	377.78	857.97	0.26	0.44
Noviembre	410.09	799.39	0.47	0.51
Diciembre	383.46	764.72	0.53	0.50

TABLA No. 4B

Meses	AÑO 1986		Estación: Balboa	
	Irradiancia Medla (Langleys/día)	Irradiancia Extraterrestre Promedio (Langleys/día)	Brillo solar Relativo	Irradiancia Relativa
Enero	467.70	787.19	0.67	0.59
Febrero	483.68	846.26	0.52	0.57
Marzo	495.14	897.58	0.61	0.55
Abril	388.88	914.21	0.45	0.43
Mayo	443.46	900.41	0.46	0.49
Junio	379.82	885.03	0.27	0.43
Julio	380.31	888.42	0.31	0.43
Agosto	373.64	901.58	0.26	0.41
Septiembre	405.62	896.95	0.33	0.45
Octubre	350.47	857.97	0.28	0.41
Noviembre	355.35	799.39	0.37	0.44
Diciembre	435.85	764.72		0.57