

CALCULO DE COEFICIENTES DE TURBIEDAD ATMOSFERICA*

MARIA VICTORIA CARRILHO

Servicio Meteorológico Nacional

Se ha desarrollado un programa computacional en FORTRAN IV para procesar los datos de intensidad de radiación solar directa obtenidos con pirheliómetro de Linke, calcular la aeromasa y los distintos coeficientes de turbiedad atmosférica.

Se describen sintéticamente el método de medición y los fundamentos en que se basa el programa.

It has been developed a computational programme in FORTRAN IV to compute direct solar radiation data obtained with a Linke pirheliometre, the airmass and different atmospheric turbidity coefficients. It is briefly explained the method to measure the solar radiation intensity and the programme foundations.

* Este trabajo es parte del estudio de la tendencia y variación de los coeficientes de turbiedad atmosférica y su relación con parámetros meteorológicos que se desarrolla en la División Contaminación del Aire del Instituto de Física de la Atmósfera (Servicio Meteorológico Nacional)

I. INTRODUCCION

I.1 Radiación Solar y su Atenuación en la Atmósfera

La intensidad de la radiación solar que incide en el tope de la atmósfera puede ser calculada en función de la época del año mediante la siguiente ecuación

$$I(R) = I_0 \frac{1}{1,004 + 0,0334 \cdot \sin \left(\frac{\text{día} - \text{Abril } 4}{365,25} \cdot 360 \right)} = \frac{I_0}{S} \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad interceptada por la Tierra a distancia media del Sol y R el radio de la órbita. De acuerdo a lo establecido por la Escala Internacional de 1956 el valor de I_0 es 1.98 ly.

Al atravesar la atmósfera, la radiación es atenuada por distintos procesos. De acuerdo a la ley de Beer la intensidad transmitida por la atmósfera a distancia media Tierra - Sol es

$$I(\nu) = S^{-1} I_0(\nu) \exp(-m \tau(\nu)) \quad (2)$$

donde τ es el coeficiente de atenuación específico y m la aeromasa. Para una atmósfera homogénea se puede deducir de consideraciones geométricas que $m = \text{sen}^{-1} \theta$ donde θ es la altura del Sol. Si consideramos la esfericidad de la atmósfera y sus propiedades refractantes la dependencia de la aeromasa con la altura del Sol es mucho más complicada y puede ser evaluada mediante una ecuación desarrollada por Kasten (Fröhlich, C. 1976a).

$$m = \frac{1}{\text{sen } \theta + 0,15 (\theta + 3,885)^{-1,253}} \quad (3)$$

donde θ debe expresarse en grados sexagesimales.

La diferencia entre esta expresión y $\text{sen}^{-1} \theta$ es menor que el 1% para elevaciones mayores que 18°.

La altura del Sol puede calcularse a partir de la ecuación (4) conociendo la declinación del Sol, la latitud del lugar y el tiempo verdadero en que se efectúa la observación

$$\text{sen } \theta = \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (4)$$

ϕ es la latitud del lugar, δ es la declinación del sol, que está dada por

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left(\frac{360 (284 + n)}{365} \right) \quad (\delta \text{ en grados}) \quad (5)$$

donde n es el número de día contado a partir del 1 de enero, t es el ángulo horario dado por

$$t = t' + ET + \frac{\text{Long } t' - \text{Long del lugar}}{15} - 12 \quad (6)$$

donde t' es la hora oficial y ET la ecuación del tiempo.

1.2 Procesos de Atenuación de la Radiación en la Atmósfera

En la atmósfera la radiación solar es atenuada fundamentalmente por procesos de difusión y absorción selectiva. Entre ellos podemos distinguir la difusión molecular, la absorción selectiva por distintos gases atmosféricos, vapor de agua y agua líquida y la difusión por partículas del aerosol atmosférico.

De acuerdo a la teoría de Rayleigh sobre difusión molecular y considerando que el ozono es el único gas atmosférico que presenta fuertes bandas de absorción en la región ultravioleta y visible la intensidad transmitida en esta región del espectro será

$$I = \int I(\nu) d\nu = \left\{ I_0 \frac{P}{S} \exp \left[- \left(\frac{P}{P_0} \tau_R(\nu) + \tau_o(\nu) + \tau_A(\nu) \right) m \right] \right\} d\nu \quad (8)$$

donde τ_R , τ_o y τ_A son los coeficientes de atenuación por difusión molecular, por absorción por ozono y difusión por aerosoles respectivamente. La difusión por aerosoles se denomina en general turbiedad. Se han definido varios índices para medir la turbiedad atmosférica. Entre ellos podemos citar

- El factor de turbiedad de Linke T que se define como el número de atmósferas limpias y secas que producirían la misma atenuación de la radiación total incidente que la atmósfera real, es decir

$$I = S^{-1} I_0 \exp(-T \tau_R(m)m) \quad (9)$$

- El coeficiente de turbiedad de Ångström β que se define como el coeficiente de atenuación para la longitud de onda de μ , o sea

$$\tau_A(\nu) = \beta \nu^{-\alpha} \quad (\nu \text{ en } \mu) \quad (10)$$

El parámetro α depende de la distribución de tamaños de las partículas que constituyen el aerosol atmosférico. α tiende a 4 para un aerosol de partículas muy pequeñas (difusión molecular) y a cero para un aerosol constituido fundamentalmente por partículas grandes. El valor promedio de α para el aerosol continental es 1.3.

1.3 Medición de la Turbiedad Atmosférica

1.3.1 Mediciones Pirheliométricas

La medición de la intensidad de la radiación solar directa incidente en superficie se realiza generalmente utilizando un pirheliómetro de Linke o un solfotómetro de Volz.

Como uno de los objetivos del programa desarrollado es el procesamiento de datos pirheliométricos obtenidos con el instrumento mencionado en primer término, sólo se hará referencia a éste, remitiendo al lector interesado en detalles y funcionamiento del solfotómetro a Frölich, C., 1976b y Annals of the International Geophysical Year.

El pirheliómetro de Linke es básicamente una termopila y posee tres filtros de corte Schott y uno de cuarzo los que permiten medir la intensi-

dad de la radiación en distintos intervalos del espectro solar.

La Figura 1 muestra las curvas de transmitancia de los distintos filtros de corte. Mediante estos filtros y la intensidad total incidente se determina la intensidad en los siguientes intervalos espectrales

$$\nu \leq 0.530 \mu$$

$$\nu \leq 0.630 \mu$$

$$0.630 \leq \nu \leq 0.700 \mu$$

Debido a que la transmitancia de los filtros no es del 100%, las intensidades medidas deben multiplicarse por el factor de corrección correspondiente a cada filtro.

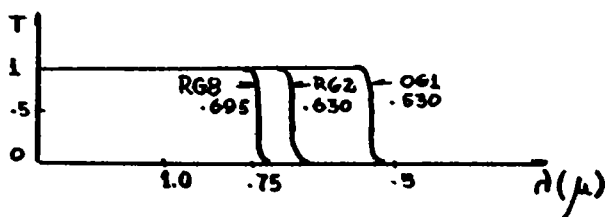


Figura 1: Transmitancia de los filtros de corte Schott

1.3.2 Cálculo del Factor de Turbiedad de Linke

De acuerdo a la ecuación (9)

$$T = \ln\left(\frac{I_0}{S \cdot I}\right) P(m') \quad (11)$$

donde $I_0 = 1.98 \text{ cal min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, $m' = \frac{P}{P_0} m$ es la aeromasa corregida y

$$P(m') = \left[\tau_R(m') \cdot m' \right]^{-1}$$

$P(m')$ puede ser evaluado en base a los cálculos realizados por Feussner y Dubois de $\tau_R(m')$. (Annals of the International Geophysical Year).

1.3.3 Determinación de los Coeficientes α y β Ångström

Ambos coeficientes se calculan midiendo la atenuación de la radiación solar en los intervalos de la región ultravioleta mencionados en la Sec. I. 3.1

α y β pueden evaluarse aplicando la ecuación (9) a los intervalos $\nu \leq 5300 \text{ Å}$ y $6300 \text{ Å} \leq \nu \leq 7000 \text{ Å}$ ó a los intervalos $\nu \leq 6300 \text{ Å}$ y $6300 \text{ Å} \leq \nu \leq 7000 \text{ Å}$ obteniéndose las siguientes expresiones

$$\alpha = \frac{\ln \frac{E_1}{E_2}}{\ln \frac{\nu_2}{\nu_1}} \quad \beta = E_1 \nu_1^{-\alpha} = E_2 \nu_2^{-\alpha} \quad (12)$$

$$E_i = \frac{\ln \frac{I_0 \Delta i}{S I \Delta i}}{m} - \left(\frac{P}{P} \bar{\tau}_R (m') + \bar{\tau}_0 (m) \right) \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

Con los índices 1 y 2 se han indicado los intervalos que constituyen a cada uno de los pares de intervalos espectrales mencionados. En consecuencia es necesario conocer:

i) La intensidad de la radiación incidente $I_0 \Delta i$ en el tope de la atmósfera para cada intervalo. Los valores de $I_0 \Delta i$ de acuerdo a la distribución de la radiación extraterrestre dada por Johnson es la siguiente

$\nu \leq 0.530$	0.558 ly
$\nu \leq 0.630$	0.828 ly
$0.630 \leq \nu \leq 0.700$	0.150 ly

ii) Los coeficientes de atenuación medios $\bar{\tau}_R$ y $\bar{\tau}_0$ y la longitud de onda efectiva para cada intervalo.

En el manual N° 299 de la Organización Meteorológica Mundial se hallan graficados en función de la aeromasa los coeficientes de atenuación medios en base 10, y en función de éstos la longitud de onda media efectiva; también se encuentra allí la información dada en i).

II. PROGRAMA COMPUTACIONAL EN FORTRAN IV PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS PIRHELIOMETRICOS Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE TURBIEDAD

El programa desarrollado tiene fundamentalmente cuatro objetivos

- i) El cálculo de la intensidad total incidente e intensidad transmitida por cada uno de los filtros del pirheliómetro de Linke.
- ii) El cálculo de la aeromasa.
- iii) El cálculo del factor de turbiedad.
- iv) El cálculo de los coeficientes α y β de Angström.

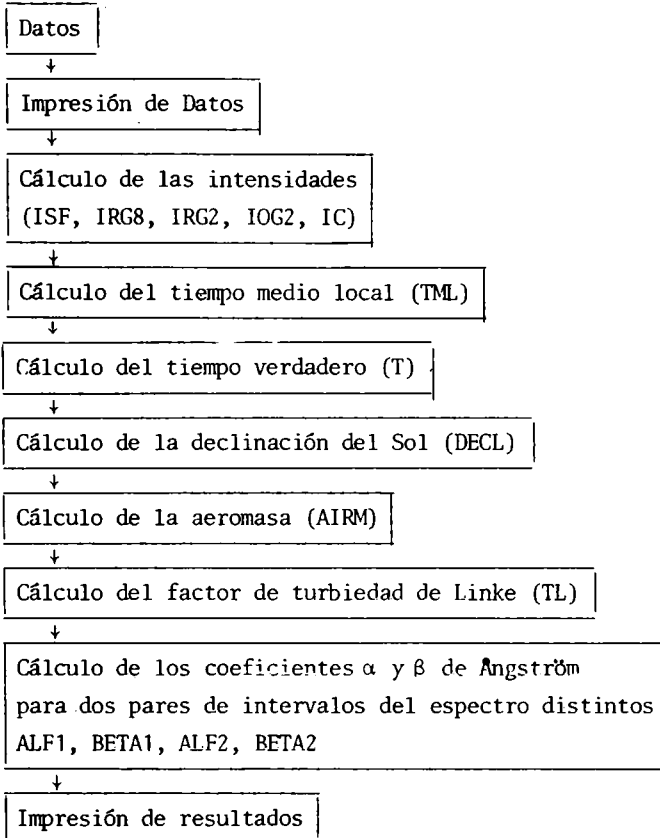
II.1 Entrada

En la siguiente tabla se resumen los datos necesarios para calcular los parámetros mencionados y el nombre con que se los ha designado en el programa

OBJETIVO	DATO	NOMBRE CON QUE SE LO HA DESIGNADO EN EL PROGRAMA
Cálculo de intensidades reducidas a distancia media Tierra - Sol	Constante del aparato Factor de filtro correspondiente al OG1, RG2, RG8 Temperatura Corrimiento del cero del instrumento Las cuatro mediciones de intensidad total Las dos mediciones de intensidad con cada uno de los filtros	CAP FFOG1, FFRG2, FFRG8 TEMP DELT ISF1, ISF2, ISF3, ISF4 IRG81, IRG82, IRG21, IRG22, IOG11, IOG12, IC1, IC2
Cálculo de la Aeromasa	Sen (Latitud) del lugar de observación Cos (Latitud) del lugar de observación Longitud del lugar de observación Ecuación del tiempo (6) Día, mes y año Hora de observación (en horas y min.)	SLAT CLAT LONG ET D, M, A H, M
Cálculo del factor de Turbiedad	P (m) de la ec. (11)	P
Cálculo de los Coeficientes de Angström	Coeficiente de atenuación $v \leq 0.530 \mu$ por difusión molecular y $v \leq 0.630 \mu$ absorción por Ozono para $0.630 \leq v \leq$ intervalo $\leq 0.700 \mu$ Longitud de onda media efectiva para los intervalos $v \leq 0.530 \mu$ $v \leq 0.630 \mu$ $0.630 \leq v \leq$ $\leq 0.700 \mu$ Intensidad que llega al tope de la atmósfera $v \leq 0.530 \mu$ $v \leq 0.630 \mu$ $0.630 \leq v \leq$ $\leq 0.700 \mu$ Presión atmosférica	T1 T2 T5 LAMDA LAMDS IO (1) IO (2) IO (5) PR
Información adicional	Número de mediciones Número de elementos de los arreglos lineales T1 y T2 Número de elementos del arreglo lineal LAMDA Número de código de la estación de observación	N NT NL NES

II.2 Desarrollo del Programa

El diagrama de flujo puede esquematizarse de la siguiente forma:



Las intensidades han sido reducidas a distancia media Tierra - Sol y debido a que la sensibilidad del pirheliómetro varía con la temperatura se ha aplicado una corrección que tiene en cuenta esta variación y que está dada por el siguiente factor

$$F_{TEMP} = 1 + 0.002 (T - 20)$$

donde T es la temperatura en grados centígrados. Esta corrección se indica en el certificado de calibración del pirheliómetro.

La declinación del Sol, el tiempo verdadero y la aeromasa se han calculado en base a las ec. (5), (6), y (3) respectivamente.

El factor de turbiedad de Linke y los coeficientes de Angström se han evaluado de acuerdo a las expresiones (11) y (12). Los coeficientes de atenuación que forman parte de los datos de entrada se tomaron de cada una de las referencias que se indican en la Tabla II.

El factor de turbiedad se calcula si

$$0.5 \leq \text{aeromasa corregida} \leq 10$$

y los coeficientes de Ångström si

$$1 \leq \text{aeromasa corregida} \leq 9$$

debido a que se dispone del valor de los coeficientes de atenuación sólo en esos rangos. La imposibilidad de calcularlos ya sea porque el valor de la aeromasa corregida no pertenece a los intervalos mencionados o porque el argumento de las expresiones logarítmicas de la ec. (12) sea negativo o nulo se indica con

$$TL = 0 \quad , \quad \alpha = 111.11 \quad , \quad \beta = 111.11$$

Se evalúa además el error correspondiente a cada uno de los parámetros calculados.

II.3 Salida

En la salida se registran los datos correspondientes al lugar y momento en que se ha efectuado la medición, el valor de la intensidad total y de la transmitida por cada uno de los filtros de corte, el valor del factor de turbiedad, de los coeficientes de Ångström y sus respectivos errores.

El listado del programa se encuentra a disposición del lector en la División Contaminación del Aire del Instituto de Física de la Atmósfera, Av. de los Constituyentes 3454, Buenos Aires.

B I B L I O G R A F I A

- FRÖLICH, C., 1976a: *The Solar Radiation in the Atmosphere and the Determination of the Turbidity*; WMO Training Seminar on Background Air Pollution Monitoring, Bs.As., 3-7.5.1976 Doc.1
- FRÖLICH, C., 1976b: *The Solar Radiation in the Atmosphere and the Determination of the Turbidity*; WMO Training Seminar on Background Air Pollution Monitoring, Bs.As., 3-7.5.1976 Doc.2.
- ANNALS OF THE INTERNATIONAL GEOPHYSICAL YEAR; Pergamon - Par VI pp. 402-405
- WMO OPERATIONS MANUAL FOR SAMPLING AND ANALYSIS TECHNIQUES FOR CHEMICAL CONSTITUENTS IN AIR AND PRECIPITATION - No 299- Part I pp. 2-12.
- SUPLEMENTO AL ALMANAQUE NAUTICO Y AERONAUTICO - Armada Argentina Servicio de Hidrografía Naval pp. VII-VIII.
- INSTITUTO DE FISICA DE LA ATMOSFERA, Av. de los Constituyentes 3454, Buenos Aires.