

T
64

R. 5326

i10731568



TESIS DOCTORAL

DISTRIBUCIONES DE IRRADIANCIA SOLAR DIFUSA



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
SECRETARIA GENERAL

Queda registrada esta Tesis Doctoral
al folio 68 número 5 del libro
correspondiente.

Sevilla: 16 MAR. 1987

El Jefe del Negociado de Tesis;

Isabel Gómez

FABIAN FRUTOS RAYEGO
SEVILLA, 1987

A la memoria de mi padre.

A mi mujer, Conchi.

A mis hijos, Fabián e Inmaculada.

Deseo expresar mi afecto y gratitud al Profesor Doctor Valeriano Ruiz Hernández, por sus consejos y dirección del trabajo.

Asimismo, quiero expresar mi sincero agradecimiento a todos los compañeros del departamento, en especial a mi amigo Jaime Gutierrez Benitez, con el cual he trabajado duramente en estos últimos años; al Doctor Carlos Gómez Camacho, por sus valiosas sugerencias y apoyo y a D. José Manuel Sánchez Barrera, Maestro de Laboratorio, porque siempre conté con su ayuda.

También agradezco los consejos y sugerencias en temas estadísticos a los Profesores Doctores José M^a Caridad y Ocerín, y Joaquín Muñoz.

Por último, mi gratitud a los Profesores de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales, en especial al Profesor Doctor Antonio Quijada y a D. José Luís Molina, quienes me prestaron su colaboración.

D. VALERIANO RUIZ HERNANDEZ, Catedrático de
Termodinámica y Fisicoquímica de la Universidad
de Sevilla,

I N F O R M A :

Que el trabajo titulado "Distribuciones
de irradiancia solar difusa", ha sido
realizado bajo mi dirección por D. Fabián
Frutos Rayego, para optar al grado de
Doctor en Ciencias Físicas.

Y para que así conste, se firma en Sevilla,
a 12 de marzo de 1987.



INDICE

DISTRIBUCIONES DE IRRADIANCIA SOLAR DIFUSA

<u>INDICE</u>	Pág.
Nomenclatura específica.....	1
Resumen.....	5
<u>CAPITULO I. Introducción</u>	8
I.1. Importancia de la disponibilidad de datos de radiación.....	9
I.2. Objeto del trabajo.....	11
 <u>CAPITULO II. Revisión Bibliográfica de Modelos y Correlaciones para Estimar la Irradiación Difusa en Función de la Irradiación Global</u>	13
II.1. Introducción al estudio de modelos de cálculo de la irradiación solar en la superficie terrestre.....	14
II.1.1. Modelo circunsolar.....	17
II.1.2. Modelo isótropo.....	19
II.1.2.1. ASHRAE.....	19
II.1.3. Modelos anisótropos.....	20
II.1.3.1. Temps-Coulson.....	21
II.1.3.2. Klucher.....	22
II.1.3.3. Hay.....	23
II.1.3.4. Willmott.....	25
II.1.3.5. Puri.....	26
II.1.3.6. Le Quere.....	26
II.1.3.7. Doe 2-04.....	27
II.1.3.8. Pérez.....	27
II.1.4. Comparación entre modelos.....	29
II.1.5. Conclusiones finales sobre el comportamiento de los modelos.....	40

II.2. Introducción al estudio de correlaciones entre la irradiación solar difusa horizontal y la irradiación global horizontal.....	42
II.2.1. Correlaciones horarias.....	43
II.2.1.1. Orgill-Hollands.....	44
II.2.1.2. Erbs et al.....	45
II.2.1.3. Spencer, C.....	46
II.2.1.4. Boes.....	47
II.2.1.5. Iqbal.....	48
II.2.1.6. Bugler.....	50
II.2.1.7. Bruno.....	57
II.2.2. Correlaciones diarias.....	58
II.2.2.1. Liu-Jordan.....	58
II.2.2.2. Collares-Rabl.....	59
II.2.2.3. Ruth-Chant.....	60
II.2.2.4. Munner-Hawas.....	61
II.2.3. Correlaciones diarias promedio mensual.....	61
II.2.3.1. Liu-Jordan.....	62
II.2.3.2. Collares-Rabl.....	62
II.2.3.3. Munner-Hawas.....	63
II.2.3.4. Page.....	63
II.2.4. Relaciones entre los valores de la irradiación horaria y diaria promedio mensual.....	64
II.3. Comentarios sobre la bondad de los ajustes de K_d , K_t	67
II.4. Necesidad de nuevos parámetros en las correlaciones K_d - K_t .	69
<u>CAPITULO III. Sistema de Medida.....</u>	71
III.1. Introducción.....	72

	Pág.
III.2. Tipos de medida.....	72
III.3. Descripción del equipo.....	73
III.3.1. Sensores.....	78
III.3.2. Instrumentos de control.....	75
III.3.3. Instrumentos de tratamiento de datos.....	77
III.3.4. Esquema de la estación de medida.....	77
III.4. Filosofía de almacenamiento utilizada y medidas realizadas.....	82
III.4.1. Diagrama de bloques del programa que controla el sistema de medida.....	86
III.5. Operatividad y mantenimiento del sistema de medida.....	90
III.5.1. Operaciones de montaje.....	90
III.5.2. Operaciones de mantenimiento.....	92
 <u>CAPITULO IV. Correlaciones entre la Irradiación Difusa y</u>	
<u>Global para varias localidades Españolas.</u>	
<u>Estudio de distribuciones de K_d.....</u>	93
IV.1. Introducción.....	94
IV.2. Base de datos.....	95
IV.3. Correlaciones diarias.....	97
IV.3.1. Comparación de distintas correlaciones K_d, K_t diarias.....	101
IV.3.2. Estudio de distribuciones de frecuencias K_d, K_t para Madrid, Sevilla y Valencia.....	106
IV.4. Correlaciones decenales.....	110
IV.4.1. Comparación entre las correlaciones K_d, K_t decenales.....	114
IV.5. Correlaciones diarias promedio mensual.....	115

IV.5.1. Comparación entre correlaciones diarias promedio mensual.....	118
IV.5.2. Estudio de distribuciones de frecuencias diarias promedio mensual para Madrid.....	120
IV.6. Correlación entre valores horarios de la irradiación difusa horizontal y global horizontal.....	122
IV.6.1. Estimación de la irradiación difusa promedio horaria a partir de K_t	124
IV.6.2. Estudio comparativo de correlaciones horarias de K_{do} y K_t	135
 <u>CAPITULO V. Irradiancia Solar Difusa a partir de las Medidas de</u>	
<u>Irradiancia Global, utilizando la Altura del Sol</u>	
<u>como Parámetro.....</u>	142
V.1. Introducción y antecedentes.....	143
V.2. Base y procesamiento de datos.....	146
V.3. Relaciones M_t - M_d para distintas alturas del sol.....	147
V.4. Resultados de las relaciones M_t - M_d para alturas de 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° y 70°	153
V.5. Comparación entre las distribuciones horarias e instantáneas en función de la altura del sol.....	162
 <u>CAPITULO VI. Estudio de Distribuciones de Irradiancia Solar</u>	
<u>Difusa correspondientes a un mismo Valor de la</u>	
<u>Irradiancia Global Horizontal, para Cielos Claros.....</u>	166
VI.1. Introducción.....	167
VI.2. Origen de la dispersión de la irradiancia solar difusa correspondiente a un mismo valor de la irradiancia global horizontal para cielos claros.....	168

VI.2.1. Variación de la irradiancia difusa con los parámetros atmosféricos.....	168
VI.2.2. Variación de la irradiancia directa con los parámetros atmosféricos.....	173
VI.2.3. Variación de la irradiancia global horizontal con los parámetros atmosféricos.....	176
VI.3. Base y procesamiento de datos.....	180
VI.4. Distribuciones observadas de irradiancia difusa en torno a un mismo valor de irradiancia global para diversas alturas del sol.....	181
VI.5. Ajuste de funciones de distribución gamma de la irradiancia difusa correspondiente a una banda de irradiancia global.....	193
VI.5.1. Función densidad gamma de tres parámetros. Test de Kolmogorov-Smirnov.....	203
VI.6. Resultados.....	207
VI.6.1. Distribuciones para alturas del sol de 30°, 40°, 50°, 60° y 70°.....	208
<u>CONCLUSIONES</u>	243
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	247

NOMENCLATURA ESPECIFICA

NOMENCLATURA ESPECIFICA

H, irradiación ó exposición : energía incidente por unidad de área en un tiempo definido.

$$H = \int_{t_0}^{t_1} I \cdot dt$$

Unidades : J/m^2 ó multiples del S.I.

I, irradiancia: energía incidente por unidad de área y por unidad de tiempo.

Unidades : W/m^2 .

Radiación, término genérico utilizado cuando se hace referencia a la energía proveniente del sol.

SUBINDICES

- g, global o total
- d, difusa
- D, directa
- n, normal
- o, extraterrestre
- s, superficie cualquiera
- h, horizontal

SUPERINDICES

En general no hay necesidad de utilizarlos, excepto en el caso de emplear relaciones diarias y horarias simultáneamente. Entonces, indican el intervalo de integración :

- h, hora
- d, día

Un guión horizontal sobre H ó I significa que se toman valores promedios.

Ejemplos:

Hgh, irradiación global horizontal en una hora o en un día, según se exprese.

Hds, irradiación global sobre superficie inclinada

Hoh, irradiación extraterrestre sobre plano normal a los rayos del - sol.

Idh, irradiancia difusa horizontal

$\bar{H}gh$, irradiación global horizontal promedio de un período de tiempo dado

$\frac{h}{\bar{H}gh}$, irradiación global horizontal promedio horario

$\frac{d}{\bar{H}gh}$, irradiación global horizontal promedio diario.

Kt, cociente entre la irradiación global horizontal y la irradiación extraterrestre horizontal, Hgh/Hoh

Kd, cociente entre la irradiación difusa horizontal y la irradiación global horizontal, Hdh/Hgh

Kdo, cociente entre la irradiación difusa horizontal y la irradiación extraterrestre horizontal, Hdh/Hoh

Mt, cociente entre la irradiancia global horizontal y la irradiancia extraterrestre horizontal, Igh/Ioh

Md, cociente entre la irradiancia difusa horizontal y la irradiancia extraterrestre horizontal, Idh/Ioh

ρ , albedo de una superficie

ANGULOS

i, incidencia

θ_z , cenital

β , inclinación de una superficie

α , altura del sol

L, latitud

l, longitud

δ , declinación

ω , horario

Ac, azimut de una superficie

As, azimut del sol

RESUMEN

RESUMEN

En la presente tesis se hace un estudio de distribuciones de la radiación difusa en función de la altura del sol, de tal manera que si fijamos la radiación global horizontal y la altura del sol, podemos hallar la radiación difusa que le corresponde, así como el margen de probabilidad con que puede ser obtenida.

El estudio consta de dos etapas básicas. En una primera, se analizan las relaciones entre radiación difusa y la global en todas las formas que ha sido posible y se ha creído más conveniente. En la segunda etapa, se analizan las causas de la dispersión de la radiación difusa observada correspondiente a un mismo valor de la radiación global horizontal. A consecuencia de esta dispersión y de las causas que la originan, se ve claramente la necesidad de abordar este tipo de problemas desde unas perspectivas distintas a como se ha venido haciendo hasta ahora.

En el capítulo I, se establecen los objetivos generales de este trabajo, destacándose la importancia de poseer buenos datos de radiación y de otros parámetros relacionados con ella para posteriores usos o aplicaciones.

En el capítulo II, se revisan los principales modelos de cálculo de radiación sobre superficies inclinadas, incluyendo un estudio comparativo de la bibliografía existente. Se desarrolla un estudio similar de las correlaciones entre la irradiación global y la irradiación difusa .

La parte experimental, descripción del equipo de medida y su instalación, el tratamiento y la metodología utilizada para el

almacenamiento de los mismos, está recogida en el capítulo III.

En el capítulo IV, se obtienen correlaciones diarias, diarias promedio decenal y diarias promedio mensual entre la radiación difusa y global horizontal para Madrid, Sevilla y Valencia, haciéndose una comparación tanto entre ellas como con otras obtenidas por otros investigadores en diversas partes del mundo. También se dan las correlaciones horarias entre la radiación difusa y global a partir de los datos registrados en nuestra estación de medida. Simultáneamente se analizan las distribuciones de la radiación difusa y la radiación global para las localidades anteriormente citadas.

El estudio detallado de la radiación difusa y global horizontal en función de la altura del sol se hace en el capítulo V. En él se describe la metodología empleada para conseguir modelizar analíticamente las distribuciones de radiación difusa resultante en función de la global. También se ha hecho un estudio semejante de las correlaciones horarias de Iqbal, en función de la altura del sol y se aportan las ecuaciones necesarias para su utilización por ordenador.

Finalmente, en el capítulo VI, se analizan las dispersiones de valores de radiación difusa que le corresponde a un mismo valor de radiación global para una altura del sol dada, describiéndose una nueva metodología capaz de hallar la radiación difusa para un determinado valor de la radiación global, así como la probabilidad con que este valor puede ser obtenido en situaciones de cielos claros.

CAPITULO I.
INTRODUCCION

CAPITULO I

INTRODUCCION

I.1. Importancia de la disponibilidad de datos de radiación.

A efectos prácticos, lo que llamamos radiación solar es la radiación electromagnética emitida por el sol, con longitudes de ondas comprendidas entre 0.2 y 3 μm y con una distribución energética muy próxima a la producida por un cuerpo negro a 5777 K.

La exposición energética o irradiación es la energía radiante por unidad de área que llega proveniente del sol en un intervalo de tiempo determinado. Admitimos que se descompone en irradiación directa o de incidencia normal y en irradiación difusa proveniente del resto del cielo. La suma de ambas componentes, recibidas sobre una superficie horizontal, es lo que llamamos irradiación global sobre superficie horizontal.

Para el diseño de instalaciones de aprovechamiento de energía solar en sus formas de conversión térmica a baja temperatura, conversión biológica y fotovoltaica es necesario el conocimiento de la irradiación global en superficies con cualquier orientación e inclinación. Asimismo para el diseño de instalaciones con concentración se necesita la componente directa de la radiación solar. Para el cálculo de la componente directa y de la global sobre superficies inclinadas, es necesario disponer primero de datos de irradiación global en superficie horizontal y posteriormente su descomposición en sus componentes directa y difusa.

Es necesario, además, que los datos mencionados estén expresados en una base de tiempo conveniente, que permita abordar los problemas de simulación de sistemas de energía solar de una manera rigurosa.

En España no se dispone de datos medidos de radiación sobre

superficies inclinadas. El Instituto Nacional de Meteorología, en sus publicaciones anuales proporciona datos de irradiación global diaria y horaria de algunas localidades españolas y datos de irradiación difusa y directa horaria de muy pocas localidades.

En Andalucía, disponemos actualmente de unos 10 años medidos de radiación global horizontal diaria de las principales capitales andaluzas, aunque con lagunas.

Sin embargo, este tipo de datos resulta insuficiente por la dificultad de extrapolar a otras localidades, debido a la existencia de microclimas muy variados.

Debido a que el disponer de valores de irradiación sobre una superficie en cualquier orientación e inclinación, así como la distribución de temperaturas a lo largo de un día representativo de un período de tiempo determinado (año, mes, década, etc.) es una necesidad para el diseño no sólo de instalaciones de energía solar sino también de aire acondicionado en general ó el propio diseño arquitectónico y urbanístico, ó como aplicación a la agricultura, a la hidrología ó a los sistemas de captación para producir electricidad a través de paneles fotovoltaicos, se ha hecho un gran esfuerzo en medios universitarios españoles y andaluces (1) en particular para estimar la energía recibida sobre una superficie inclinada con la orientación deseada.

Para conseguir evaluar la irradiación solar sobre superficies inclinadas a partir de los datos originales hay varios métodos, estando los principales descritos brevemente en el capítulo II. Parece que la metodología de Liu-Jordan es la más adecuada.

Esta metodología necesita el conocimiento de funciones que relacionan K_d , cociente entre la irradiación difusa horizontal y la irradiación global horizontal con K_t , cociente entre la irradiación global horizon-

tal y la extraterrestre horizontal.

En la aplicación de estos métodos en España se empleaban correlaciones obtenidas para otros lugares, en concreto para USA, a pesar de que diversos autores habían demostrado que ésto introducía errores importantes. Se necesita el conocimiento de estas correlaciones para las zonas en que haya que aplicarlas.

El establecimiento de estas correlaciones K_d, K_t necesita de medidas simultáneas de irradiación global en superficie horizontal e irradiación difusa ó directa. La escasez de este tipo de medidas se manifiesta tanto en España como en otros lugares del mundo, excepto USA, donde el número de estaciones de este tipo es bastante mayor.

De otro lado, según han demostrado otros investigadores (34-35), si no se disponen de series largas temporales de medidas de radiación y de otras variables meteorológicas, sólo el empleo de datos de radiación difusa y global ó directa y global, no es suficiente para poder estimar con precisión con posterioridad la radiación difusa en función de la global, dada la notable dispersión que existe de radiación difusa correspondiente a un mismo valor de la radiación global.

I.2. Objeto del trabajo.

De todo lo anterior, surge el trabajo que se somete a consideración y que tiene cuatro grandes objetivos:

1. Clarificación del panorama actual de modelos y correlaciones para aplicación al cálculo de la radiación solar interceptada por cualquier superficie.
2. Establecimiento de correlaciones K_d-K_t para algún lugar de la región andaluza, en concreto Sevilla, para poder aplicar posteriormente la metodología de Liu-Jordan.

3. Puesta a punto de una estación de medida de radiación que sirva de base para:
 - a) Referencia de otras que se pudieran establecer en Andalucía.
 - b) Verificación y estudio de modelos y correlaciones.
 - c) Conocimiento profundo de las dificultades que supone el mantenimiento de una estación de medida de radiación.
 - d) Incorporación de las medidas a la red radiométrica de Andalucía.

4. Estudio de distribución de irradiancia difusa en función de la irradiancia global para varias elevaciones del sol y se modelizan las distribuciones resultantes mediante expresiones analíticas concretas, de manera que puedan resultar útiles para posteriores procesos de simulación por ordenador. Esto es debido a la dispersión que se observa de la radiación difusa en torno a valores idénticos de radiación global.

Hay que señalar que las correlaciones K_d , K_t obtenidas en el capítulo IV, para Sevilla, han sido aplicadas por un grupo de investigadores universitarios (1) para la obtención de tablas y mapas de la región andaluza.

CAPITULO II.

REVISION BIBLIOGRAFICA DE MODELOS Y CORRELACIONES
PARA ESTIMAR LA IRRADIACION DIFUSA EN FUNCION
DE LA IRRADIACION GLOBAL

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA DE MODELOS Y CORRELACIONES PARA ESTIMAR LA IRRADIACION DIFUSA EN FUNCION DE LA IRRADIACION GLOBAL.

II.1.- Introducción al estudio de modelos de cálculo de la irradiación solar en la superficie terrestre.

El cálculo exacto de la intensidad de la radiación directa, difusa y global en la superficie terrestre es un problema difícil, debido fundamentalmente a que la atenuación de la radiación solar por la atmósfera es un proceso esencialmente selectivo, esto es, depende de la longitud de onda de la radiación solar incidente.

Este cálculo puede hacerse directamente resolviendo un sistema complejo de ecuaciones hidrodinámicas y de transferencia de calor por radiación. Este problema ha sido tratado por Kondratyev (2).

Debido a la dificultad que encierra la resolución de las ecuaciones mencionadas, se han elaborado numerosos modelos relativamente simplificados, que calculan la radiación incidente sobre la superficie terrestre con bastante precisión.

Estos modelos tienen como fundamento el conocimiento de la composición de la atmósfera, y se concretan en una división por capas - de distintos espesores a las cuales se les asignan valores definidos de temperatura, presión, densidad molecular, densidad de vapor de agua, ozono y coeficientes de atenuación y absorción de los distintos componentes.

La aplicación de estos modelos se concreta en programas de ordenador apoyados casi todos ellos en el modelo de transmisión atmosférica LOWTRAN, realizado por el U.S. Air Force Geophysics Laboratory. En particular, el código SOLTRAN para la componente directa normal y el BRITE para la radiación global.

Asimismo, los modelos parametrizados, denominados por Iqbal (40), A, B, y C permiten también realizar los cálculos mencionados.

Recientemente, un estudio comparativo entre estos modelos parametrizados realizado por A. Louche, G. Simonnot y M. Iqbal (55), ha encontrado que el modelo C es el más preciso para estimar la componente directa, mientras que para la difusa y la global lo es el B.

La aplicación de los modelos parametrizados no resulta difícil en U.S.A., donde se dispone de los datos de partida. En el resto del mundo, incluida Europa y España, no se dispone de esta información de partida.

Por ello la conveniencia de conseguir modelos más simples que utilicen datos más fáciles de medir y requieran menos tiempo de cálculo en computador.

Los modelos que calculan los distintos componentes de la radiación los podemos dividir en dos grandes grupos:

- a) Los modelos parametrizados y tipo LOWTRAN que necesitan para su aplicación el conocimiento del contenido de ozono, - dióxido de carbono, vapor de agua, aerosoles y otros componentes en la atmósfera.

- b) Los modelos que emplean medidas de irradiación global horizontal y correlaciones establecidas entre esta magnitud y la radiación difusa o la directa.

Estos modelos se aplican con más amplitud, debido a que los datos de base necesarios son más abundantes.

Como ya se ha indicado, salvo en U.S.A., no se dispone de los valores de partida necesarios para aplicar la metodología de cálculo a que se refiere el apartado a), por lo que no hay más remedio que acudir a la indicada en el b).

La metodología de cálculo de irradiación en superficies inclinadas implica los siguientes pasos:

- 1) Disponer de valores de irradiación global horizontal, H_{gh} medidas o calculadas a partir de algún otro parámetro medido, como por ejemplo, horas de sol.
- 2) **Calcular** el índice de claridad , K_t , cociente entre la irradiación global horizontal H_{gh} y la irradiación extraterrestre horizontal H_{oh} .
- 3) **Determinar** la irradiación difusa horizontal H_{dh} , a partir de K_d , cociente entre H_{dh} y H_{gh} , utilizando correlaciones del tipo K_d, K_t .
- 4) **Calcular** la componente difusa sobre superficie inclinada

con cualquier orientación e inclinación. Para ello es necesario elegir entre la aplicación de un modelo de distribución de la componente difusa isótropo o anisótropo.

Dado que existe una gran variedad de modelos anisótropos, se va a realizar una revisión sintetizada de los principales modelos de difusa incluyendo los modelos isótropos y el modelo ASHRAE.

También se hace una comparación entre los principales modelos anisótropos.

II.1.1.1.- Modelo circunsolar.

En este tipo de modelo se supone que toda la radiación que llega a una superficie horizontal viene directamente de la dirección del sol y de sus alrededores.

Por ello, la componente difusa se calcula de forma análoga a la componente directa. La Fig. II.1. muestra esta situación.

Este modelo se aplica a días con atmósferas limpias y sin nubes. En general, el modelo sobreestima la radiación difusa que alcanza la superficie.

El valor horario de la componente difusa sobre superficie inclinada se determina por la expresión:

$$H_{ds} = H_{dh} \cdot r_b$$

donde r_b es el cociente entre los cosenos de los ángulos de incidencia, y zenital calculados a mitad de cada hora.

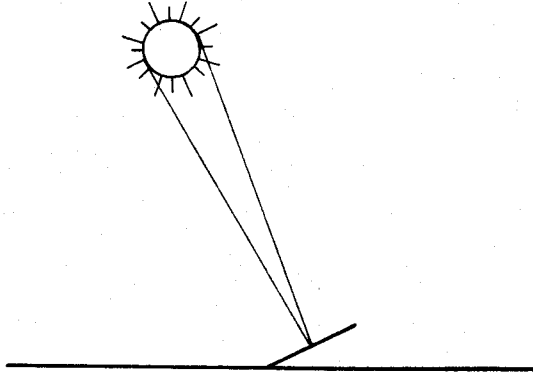


Fig. II.1. Modelo circunsolar.

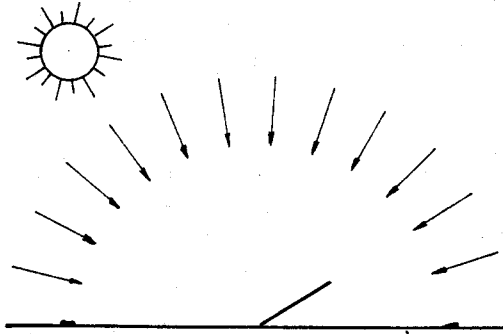


Fig. II.2. Modelo isótopo.

II.1.2.- Modelo isótropo.

Se supone que la intensidad de la radiación difusa es uniforme en toda la bóveda celeste, Fig. II.2. Esto es aproximadamente cierto en el caso de cielos cubiertos.

Se puede demostrar que en estas condiciones, la irradiación difusa horaria incidente sobre una superficie inclinada es:

$$H_{ds} = \frac{1}{2} H_{dh} (1 + \cos \beta)$$

siendo β , la inclinación de la superficie.

De forma casi general, este modelo subestima la radiación difusa horaria sobre superficies inclinadas al sur, y sobreestima para otras orientaciones distintas a la sur.

II.1.2.1.- ASHRAE

Desarrollado por Threlkeld y descrito en (3-4), este es un modelo isótropo, aplicable para días claros. Calcula la radiación difusa sobre superficies inclinadas a partir de la irradiación directa y del conocimiento de un parámetro C definido como el cociente entre las irradiaciones difusa horizontal y directa normal. Este parámetro C, depende del contenido de vapor de agua de la atmósfera y varía con la época del año.

A su vez, la irradiación directa se calcula a través de una ley empírica en función de la altura del sol.

La aplicación de este modelo requiere en primer lugar la determinación de una serie de parámetros, que son: A, irradiación solar aparente en el límite de la atmósfera; B, coeficiente de atenuación óptica atmosférica y C ya definido y que se conoce como factor de difusión.

El cálculo de la irradiación difusa sobre superficies inclinadas en una hora es:

$$H_{ds} = C \cdot HD \cdot ((1 + \cos \beta) / 2)$$

$$HD = A \cdot e^{-B/\sin \alpha}$$

El modelo tiene dos limitaciones:

- 1º) Aplicable sólo a días claros.
- 2º) Supone isotropía para la radiación difusa.

Con medidas de irradiación directa realizadas con un pirheliómetro y con medidas de irradiación global horizontal, - se puede obtener mediante ajustes por mínimos cuadrados, los parámetros A, B y C.

II.1.3.- Modelos Anisótropos.

Los modelos anisótropos tienen en cuenta, en diversos grados, el hecho de que la radiación solar difusa crece a medida - que nos acercamos al disco solar. También se pone de manifiesto el carácter anisótropo de la radiación solar para pequeñas elevaciones del sol sobre el horizonte. Por ello, y de una forma general, se puede esperar una gran divergencia en las estimaciones de difusa sobre planos inclinados entre los modelos - anisótropos e isótropos, sobre todo en los meses de invierno, a los que corresponden pequeñas elevaciones del sol.

A continuación, vamos a analizar los modelos anisótropos más destacados en la bibliografía actual:

1. Temps-Coulson; 2. Klucher; 3. Hay; 4. Willmott; 5. Puri; 6. Le Quere; 7. DOE 2-04; 8. Pérez.

II.1.3.1.- Temps-Coulson.

Con base en medidas de irradiación difusa realizadas con un piranómetro con posibilidad de orientarlo en cualquier posición de la bóveda celeste, Temps (5 y 6) corrige el modelo isótropo convirtiéndolo en anisótropo. Seleccionó los días claros que tenían similitudes en todos los parámetros que se deben tener en cuenta, tales como, espesor de agua precipitable, humedad, presión, visibilidad, etc.

En esencia, Temps incorpora al modelo isótropo unas modificaciones que están basadas en las siguientes consideraciones:

1ª) La anisotropía se manifiesta como un aumento de intensidad luminosa cerca del horizonte. Esto se recoge en el factor f_1 :

$$f_1 = 1 + \sin^3 (\beta / 2)$$

β , inclinación de la superficie respecto del horizonte.

2ª) Aumento de la intensidad próxima a la región circunso lar, factor f_2 :

$$f_2 = 1 + \cos^2 i \cdot \sin^3 \theta$$

siendo i , el ángulo de incidencia entre la normal a la superficie y la dirección de los rayos del sol y θ el ángulo zenital del sol.

Debido a estas correcciones, para días claros, la irradiación difu

sa horaria procedente de la bóveda celeste, se escribe como:

$$H_{ds} = H_{dh} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot f_1 \cdot f_2$$

También Temps encuentra una dependencia angular de la reflectividad del césped donde está midiendo con el piranómetro sobre superficie inclinada. Esto lo dedujo en base a las medidas de reflectancia hechas por Coulson, para césped de hierba. De esta forma, la difusa de albedo se vería corregida por el factor, f_3 :

$$f_3 = \left(1 + \frac{\sin^2 \theta_z}{2} \right) \cdot |\cos a|$$

siendo a , el azimut de la superficie inclinada con relación al azimut del sol.

II.1.3.2.- Klucher.

Constituye una fusión de los modelos isótropos y de Temps-Coulson. Comprueba Klucher (7) que el modelo isótropo estima correctamente la irradiación incidente sobre superficies inclinadas en días cubiertos, pero subestima para días claros o parcialmente cubiertos. Por otra parte, el modelo de Temps-Coulson proporciona buenas estimaciones para días claros, pero sobreestima la predicción para días nubosos. En definitiva, el isótropo va bien para días cubiertos y el de Temps para días despejados.

Con base en estas comprobaciones, Klucher añade una función moduladora definida por:

$$F = 1 - (H_{dh}/H_{gh})^2$$

de tal forma que cuando el día está cubierto, $H_{dh} = H_{gh}$, y $F = 0$, en cuyo caso el modelo que propone Klucher se convierte en el modelo isótropo. Si el día es despejado, $H_{dh} < H_{gh}$ y F tiende a la unidad, en cuyo caso el modelo propuesto tiende al de Temps-Coulson. Con esta modificación, la irradiación difusa sobre superficie inclinada horaria vale:

$$H_{ds} = H_{dh} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left(1 + F \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \cdot \left(1 + F \cdot \cos^2 i \cdot \sin^3 \theta_z \right)$$

Este modelo proporciona mejores estimaciones que el modelo isótropo y el de Temps-Coulson y se puede aplicar en cualquier tipo de condiciones atmosféricas según su autor.

II.1.3.3. Hay.

Hay (8), a partir de los estudios de Kondratyev (2 y 9), admite que la radiación difusa horizontal procedente de la bóveda celeste se divide en dos componentes : 1º) La difusa que llega directamente de la dirección del sol y 2º) El resto de la irradiación difusa procedente de la bóveda, que es tratada como isótropa. Ambos términos vienen influidos por un índice de anisotropía A, similar al definido anteriormente por Robinson (10) y Revfeim (11), excepto que en el modelo de Hay, dicho índice A, no es constante, sino que se le permite variar.

El índice A, es esencialmente el cociente entre la irradiación directa horaria horizontal, H_{Dh} y la irradiación extraterrestre horaria horizontal, H_{oh} . La irradiación difusa horaria total sobre superficie horizontal, tiene pues, dos términos, el circunsolar y el isótropo, que vienen afectados por el índice A y 1-A respectivamente, así:

Si $A = HDh/Hoh$, $Hdh|_{\text{circunsolar}} = Hdh \cdot A$ y la irradiación difusa isótropa horizontal es :

$$Hdh|_{\text{isótropa}} = Hdh \cdot (1 - A)$$

De aquí que la irradiación difusa horizontal sobre superficie inclinada vale:

$$Hds = Hdh (A \cdot r_d + ((1 + \cos \beta) / 2) \cdot (1 - A)) \quad (1)$$

siendo $r_d = \cos i / \cos \theta_z$.

Cuando la irradiación directa es nula, en ese caso, $Hds = Hds$ se calcula como en el modelo isótropo:

$$HDh \longrightarrow 0 \longrightarrow Hds = Hdh (1 + \cos \beta) / 2)$$

y cuando la irradiación directa se aproxima a la extraterrestre, entonces:

$$A \longrightarrow 1 \text{ y } Hds = Hdh \cdot r_d$$

es decir, se calcula como en el modelo circunsolar. Debido a que normalmente no se disponen de medidas de irradiación directa, la ecuación 1 se puede poner en función de Hgh y Hdh , ya que $HDh = Hgh - Hdh$; quedando:

$$Hds = Hdh \cdot \underbrace{((Hgh - Hdh)/Hoh \cdot r_d)}_{\text{término circunsolar}} + \underbrace{((1 + \cos \beta) / 2 \cdot (1 - (Hgh - Hdh) / Hoh))}_{\text{término isótropo}}$$

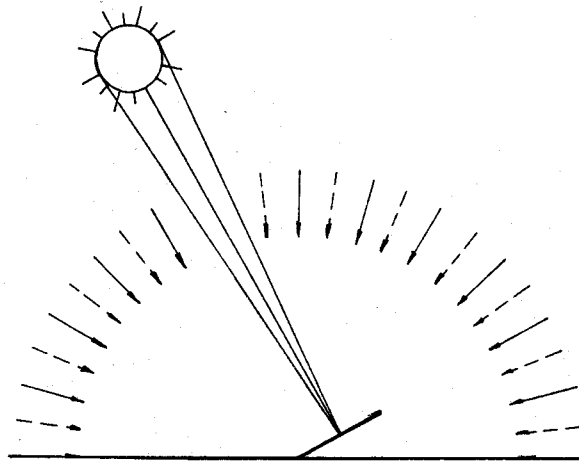


Fig. II.3. Modelo anisótropo de Hay.

II.1.3.4. Willmott.

Willmott (12) combina los modelos de Hay para el cálculo de la irradiación difusa procedente de la bóveda y el modelo de Temps-Coulson para hallar la difusa de albedo:

$$H_{ds} = H_{dh} \left(\underbrace{A \cdot r_d}_{\text{circunsolar}} + \underbrace{C_{\beta} (1 - A)}_{\text{isótropo}} \right)$$

donde C_{β} representa el factor de visión entre la bóveda celeste y la superficie inclinada, representada por un término análogo

a $\frac{1 + \cos \beta}{2}$ y que viene dado por:

$$C_{\beta} = 1.0115 - 3.54 \cdot 10^{-3} \beta - 2.46 \cdot 10^{-5} \beta^2$$

estando la inclinación de la superficie β expresada en grados.

El término de difusa procedente del albedo, es idéntico al obtenido por Temps:

$$H_{ds}|_{\text{albedo}} = H_{gh} \cdot \rho \cdot (1 + \sin^2 (\theta_z/2)) \cdot (|\cos (A_s - A_c)|)$$

siendo ρ , el coeficiente de albedo, A_s el azimut del sol y

A_c el azimut de la superficie inclinada.

II.1.3.5.- Puri y otros.

Este modelo desarrollado por Puri (13) calcula la radiación difusa sobre superficie inclinada de forma análoga al modelo de Hay, pero el índice de anisotropía toma valores diferentes dependiendo del valor que tenga K_t , cociente entre la irradiación global horizontal y la extraterrestre horizontal.

$$H_{ds} = H_{dh} \cdot (F \cdot (1 + \cos \beta) / 2 + (1 - F) \cdot F_a)$$

siendo $F = 1.0$ si $0.0 < K_t \leq 0.4$

$$F = 0.44 \quad 0.4 < K_t < 0.74$$

$$F = 0.44 - 1.65 (K_t - 0.74); \quad 0.74 \leq K_t \leq 1$$

F_a representa el factor de visión de la parte de difusa que se supone anisótropa. El cálculo propuesto por Puri es complicado y necesita mucho tiempo. Por ello, se ha buscado una solución más sencilla y se puede admitir como válida que

$$F_a = \cos i / \sin \theta_z$$

II.1.3.6.- Le Quere

Le Quere (14) calcula la radiación difusa sobre superficie inclinada de forma análoga al modelo de Hay, pero con el índice de anisotropía constante para todo tipo de cielo e igual a 0.8:

$$H_{ds} = H_{dh} \cdot (F \cdot (1 + \cos \beta) / 2 + (1 - F) \cdot \cos i / \cos \theta_z)$$

$$F = 0.8$$

i = ángulo de incidencia a la mitad de la hora

θ_z = ángulo cenital a la mitad de la hora

Este modelo fue elaborado en base a los ficheros climáticos registrados en Trappes y Carpentras (Francia) durante algunos meses de los años 1979 y 1980, de irradiación global horizontal y de irradiación difusa horizontal calculada a partir de la irradiación directa.

II.1.3.7.- DOE 2-04.

Este modelo (15) calcula la irradiación difusa horizontal a través de la expresión:

$$H_{ds} = H_{dh} \quad \text{si } \beta \leq 45^\circ$$

$$H_{ds} = F \cdot H_{dh} \quad \text{si } \beta > 45^\circ$$

donde

$$F = 0.45 \quad \text{si } \cos i < -0.2$$

$$F = 0.55 + 0.473 \cdot \cos i + 0.313 \cos^2 i \quad \text{si } \cos i > -0.2$$

i , ángulo de incidencia a mitad de la hora.

II.1.3.8.-Pérez.

En este modelo (16) se tiene en cuenta el efecto particularmente intenso de la radiación difusa circumsolar y de la radiación difusa del horizonte, al igual que el modelo de Klucher. Sin embargo, el efecto observado, se introduce no añadiendo términos multiplicativos a la ecuación isótropa, sino describiendo la bóveda celeste como isótropa, excepto para una cierta región circular centrada en la posición del sol y una banda sobre el horizonte donde se produce un aumento de la radiación difusa.

El resultado es un modelo biparametrizado, donde la irradiación difusa horaria sobre superficie inclinada viene dada

por la ecuación:

$$Hds = Hdh \cdot P/P'$$

siendo $P = (1 + \cos \beta) / 2 + 2 (F_1 - 1) \cdot (1 - \cos \theta) \cdot$

$$\cdot Z_c + 2 (F_2 - 1) \left(\xi / \pi \right) \cdot \sin \xi'$$

y $P' = 1 + 2 (F_1 - 1) (1 - \cos \theta) \cdot Z_h +$

$$+ (F_2 - 1) (1 - \cos 2 \xi) / 2$$

donde:

- θ , es el semiángulo de la región circunsolar, aproximadamente 15° .
- β , inclinación de la superficie respecto a la horizontal.
- ξ , ancho angular de la banda de horizonte, aproximadamente $6,5^\circ$.
- Z_c , representa el factor de interceptación entre el disco solar y la superficie inclinada, y viene dado por el producto de la fracción del disco solar vista por el plano inclinado y el seno de la altitud promedio de la región circunsolar respecto al plano inclinado.
- Z_h , representa el factor de interceptación, banda de horizonte y superficie inclinada. En esencia es lo mismo que Z_c , pero para la banda de horizonte. F_1 y F_2 representan respectivamente los cocientes entre las radiancias del disco y de la banda con relación a la del resto de la bóveda celeste. Se han encontrado los valores de F_1 y F_2 por procedimientos estadísticos en relación al análisis de datos medidos sobre superficie inclinada y puestos en función del ángulo zenital θ_z , el valor de Hdh y de ϵ , cociente entre Hgh y Hdh . Estos parámetros F_1 y F_2 se dan en forma matricial($5 \times 6 \times 7$), corres

pondientes a las posibles combinaciones de casos de los parámetros ($\theta_z \times Hdh \times \epsilon$).

II.1.4.- Comparación entre modelos

A. Lebru (17) estudia el comportamiento de los modelos mencionados, exceptuando el modelo de Pérez.

Con datos horarios de irradiación global horizontal y de irradiación difusa horizontal calculada a partir de medidas de irradiación directa y global horizontal, durante veintidós meses en las localidades francesas de Trappes y Carpentras en diferentes orientaciones e inclinaciones, se ha comprobado la validez de los distintos modelos y su comportamiento en las estimaciones para cualquier orientación e inclinación. Las Tablas II.1 y II.2 muestran los resultados obtenidos en las paredes verticales SUR y NORTE, respectivamente.

TABLA II.1. Irradiación difusa sobre un plano vertical SUR. Comparación entre los modelos analizados durante todo el tiempo registrado.

	DIFUSA VERTICAL	MEDIDAS	ISOTROPO	LE QUERE	TEMPS COULSON	KLUCHER	WILLMOTT	DOE 2-A	KITTLER
CARPENTRAS 1979	kWh/m ²	246	197	215	293	254	208	307	281
	ϵ (%)	-	-19,6	-12,5	19,3	-3,5	-15,5	24,8	14,6
	σ (Wh/m ²)	-	34	31	31	29	29	37	31
TRAPPES 1979	kWh/m ²	267	223	255	337	267	237	355	326
	ϵ (%)	-	-16,7	-4,7	26,1	-0,1	-11,5	32,8	22,0
	σ (Wh/m ²)	-	38	35	36	30	28	43	37
TRAPPES 1980	kWh/m ²	76	55	79	97	66	66	107	102
	ϵ (%)	-	-27,6	4,8	28,0	-12,5	-12,5	41,0	34,3
	σ (Wh/m ²)	-	39	30	34	24	23	42	38

TABLA II.2. Irradiación difusa sobre un plano vertical NORTE. Comparación entre los modelos analizados durante todo el tiempo registrado.

	DIFUSA VERTICAL	MEDIDAS	ISOTROPO	LE QUERE	TEMPS COULSON	KLUCHER	WILLMOTT	DOE2-A	KITTLER
CARPENTRAS 1979	kWh/m ²	154	197	177	268	242	145	188	190
	ϵ (%)	-	46,5	52,1	100,0	80,6	8,2	40,3	41,8
	σ (Wh/m ²)	-	48	76	60	55	47	47	47
TRAPPES 1979	kWh/m ²	158	220	192	301	253	185	211	211
	ϵ (%)	-	59,2	21,5	90,5	60,1	15,8	33,5	33,5
	σ (Wh/m ²)	-	35	81	60	45	30	31	34
TRAPPES 1980	kWh/m ²	39	54	44	73	59	47	49	52
	ϵ (%)	-	38,5	12,8	87,2	51,3	20,5	25,6	33,3
	σ (Wh/m ²)	-	18	18	32	24	14	16	17

De otra parte, las Figuras II.4 a II.6, muestran los resultados de los modelos isótopos, Klucher y Willmott a escala mensual.

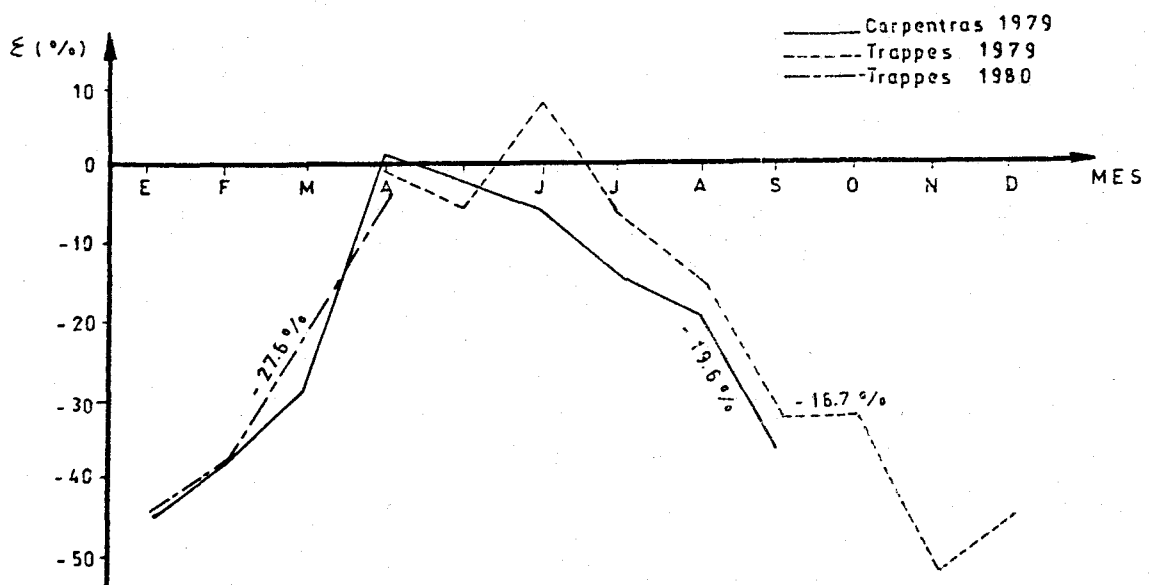


Fig. II.4. Modelo isótopo. Vertical Sur.

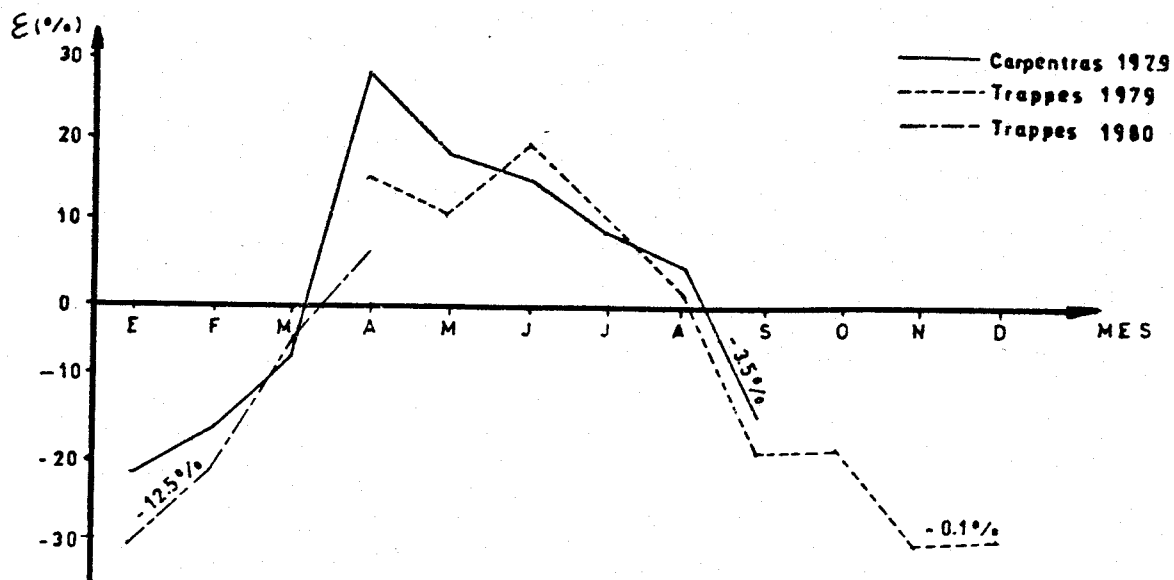


Fig. II.5. Modelo Klucher. Vertical Sur.

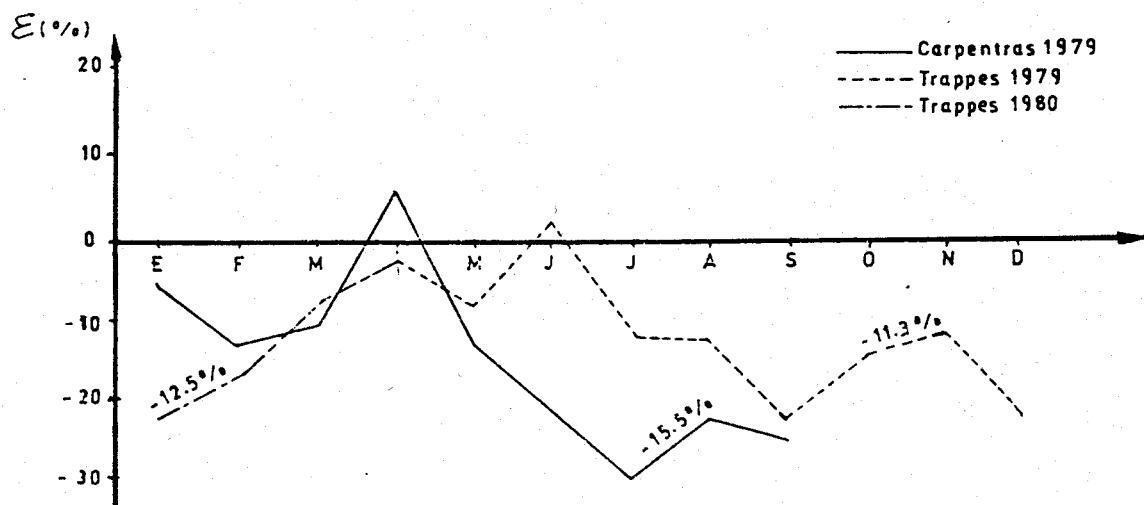


Fig. II.6. Modelo Willmott. Vertical Sur.

En estas figuras II.4 a II.6, ϵ es el cociente entre la irradiación difusa vertical calculada menos la medida y la difusa medida, expresado en tanto por ciento.

De los resultados expresados por las tablas II.1 y II.2 y de las Figuras II.4 a II.6, en función de los criterios de error relativo ϵ y de desviación típica, se extraen las siguientes conclusiones:

1. El modelo Willmott, que en el cálculo de la componente difusa es exactamente el modelo Hay, es el mejor para medidas en un plano con orientación Norte y funciona aceptablemente para planos verticales sur, aunque subestima moderadamente.

2. El modelo de Klucher, aparece como el más idóneo para planos con orientación vertical Sur, aunque sobreestima en los meses de verano y subestima algo en invierno.

3. Para meses de verano, el modelo isótropo da mejores resultados que el modelo de Willmott en plano sur, aunque no siempre, pero sobreestima de forma excesiva en los demás casos y en toda época del año.

En resumen, el modelo de Willmott es el que presenta una mayor regularidad de las estimaciones en cualquier caso.

En un trabajo más reciente (18) Pérez analiza los modelos isótropos, Klucher, Hay y el de Pérez. Elige estos cuatro modelos porque no tienen limitación en las condiciones de cielo, es decir, se aplican a días claros, parcialmente cubiertos y cubiertos.

En base a medidas de minuto a minuto de irradiación global horizontal y de irradiación global en siete superficies inclinadas y de irradiación directa, se analiza el comportamiento

de los modelos mencionados en condiciones de cielo reales y en todos los casos posibles, es decir, cubiertos, despejados y parcialmente cubiertos. Los resultados de la comparación entre las medidas y las estimaciones vienen dadas por las tablas II.3 a II.5. También se acompañan las Figuras II.7 a II.18; en ellas pueden observarse los comportamientos de días con condiciones de cielos diferentes para valores instantáneos. En las tablas II.3 a II.5 se proporcionan los siguientes valores:

H, irradiación promedio recibida por cada instrumento expresado en $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$

R, error cuadrático medio de los modelos, expresado en tantos por ciento respecto a H. Se define por:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N}} / H \times 100$$

siendo Y_i el valor estimado por el modelo, y X_i el valor medido.

A, error medio sesgado generado por los modelos, expresado en tanto por ciento respecto a H. Se define por:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{N} / H \times 100$$

i, isótropo; k, Klucher; h, Hay; p, Pérez.

	SUR 33º	SUR 43º	SUR 53º	SUR 90º	NORTE 90º	ESTE 90º	OESTE 90º
H	2563	2676	2716	2269	317	988	968
Ri	10,5	12,2	13,8	18,6	47,3	26,8	23,7
Rk	5,6	6,2	7,0	11,5	66,2	22,0	21,1
Rh	6,3	7,0	7,7	10,2	48,5	17,2	16,5
Rp	4,3	,45	5,1	7,4	22,1	10,5	10,6
Ai	-7,5	-8,8	-9,8	-13,7	24,3	-9,8	-6,3
Ak	-2,0	-2,8	-3,4	-7,3	43,5	-1,5	1,9
Ah	-1,6	-2,0	-2,2	-4,2	-4,7	-8,8	-6,2
Ap	0,8	1,1	1,3	0,9	10,4	-1,9	0,6

TABLA II. 3. Resumen del mes de febrero de 1980

	SUR 33º	SUR 43º	SUR 53º	SUR 90º	NORTE 90º	ESTE 90º	OESTE 90º
H	2219	2162	2008	1132	343	961	990
Ri	7,2	8,9	9,2	12,2	57,1	29,2	30,6
Rk	4,3	5,1	5,5	9,5	68,8	25,4	26,3
Rh	4,9	5,9	6,2	10,9	47,2	20,8	21,8
Rp	3,6	3,6	4,6	10,2	19,0	11,8	13,7
Ai	-4,1	-5,1	-4,4	-3,2	22,4	-5,1	-5,8
Ak	-1,2	-2,2	-1,0	2,7	38,4	3,0	2,4
Ah	-2,3	-3,2	-2,2	-2,3	-2,9	-6,3	-6,2
Ap	-0,1	-0,3	1,4	4,7	6,7	0,1	0,5

TABLA II. 4. Resumen del mes de abril de 1980

	SUR 33º	SUR 43º	SUR 53º	SUR 90º	NORTE 90º	ESTE 90º	OESTE 90º
H	2305	2149	1899	848	548	1246	1078
Ri	5,8	7,3	7,3	12,4	38,9	27,6	32,4
Rk	4,2	4,9	5,6	17,0	56,8	24,6	29,9
Rh	5,0	6,8	7,3	19,5	32,3	19,1	24,4
Rp	3,0	3,6	4,7	10,4	13,3	10,0	13,5
Ai	-3,2	-4,1	-2,4	-1,3	13,9	-6,3	-7,3
Ak	-0,9	-1,5	0,8	9,6	30,6	3,3	3,2
Ah	-3,1	-4,3	-3,2	-9,3	-5,4	-7,1	-10,7
Ap	0,8	-1,3	0,6	-1,5	0,1	-1,6	-2,2

TABLA II. 5. Resumen del mes de junio de 1980

El comportamiento instantáneo de los modelos, se puede observar en las Figuras II.7 a II.18, donde se representan en ordenadas la diferencia entre la energía calculada y la medida en un minuto y en abscisas la hora del día, para cinco días representativos de los datos registrados. Los modelos analizados son los siguientes:

— : isótopo; XXXX : Klucher; + + + : Hay; - . . . : Pérez

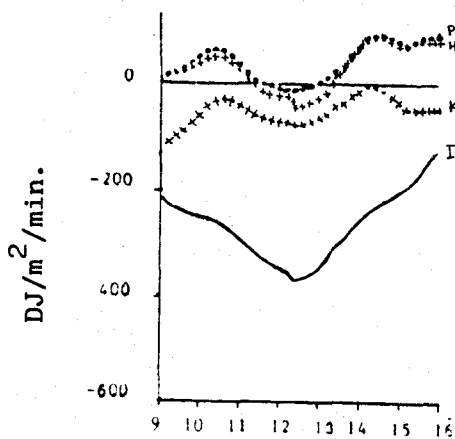


Fig. II.7. Día claro de invierno. $\beta = 43^\circ$; AC = SUR.

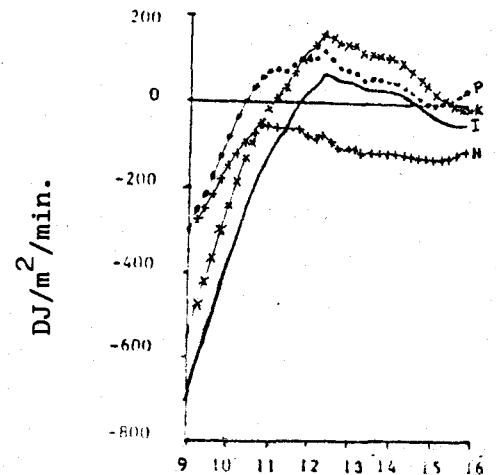


Fig. II.8. Día claro de invierno. $\beta = 90^\circ$; AC = ESTE.

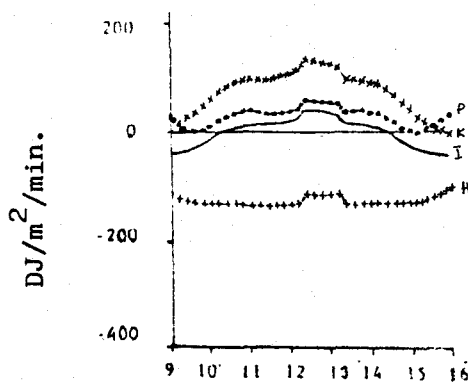


Fig. II.9. Día claro de invierno. $\beta = 90^\circ$; AC = NORTE

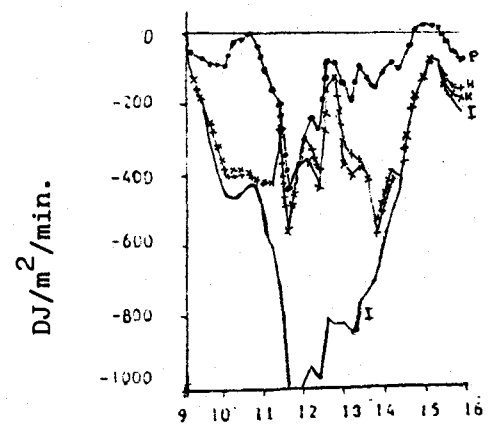


Fig. II.10. Día cubierto de invierno. $\beta = 53^\circ$; AC = SUR.

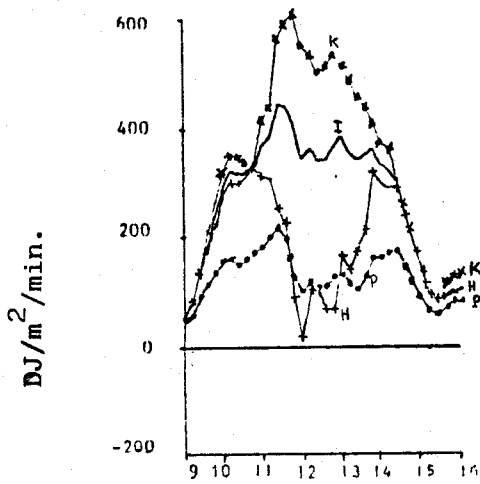


Fig. II.11. Día cubierto de invierno. $\beta = 90^\circ$; AC = NORTE

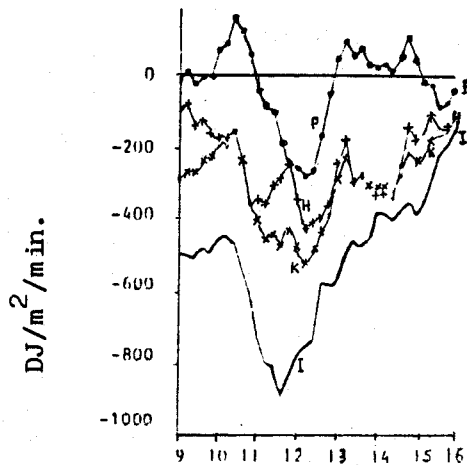


Fig. II.12. Día parcialmente cubierto de invierno. $\beta = 90^\circ$; AC = SUR.

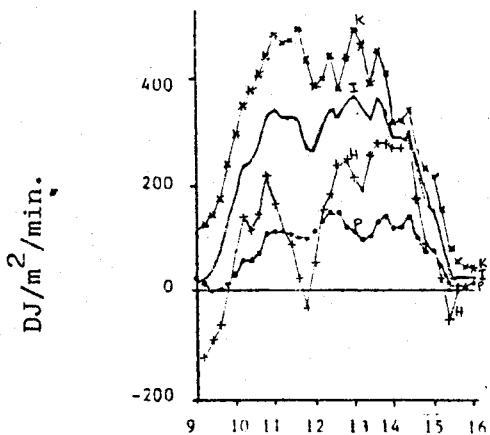


Fig. II.13. Día parcialmente cubierto de invierno. $\beta = 90^\circ$; AC = NORTE

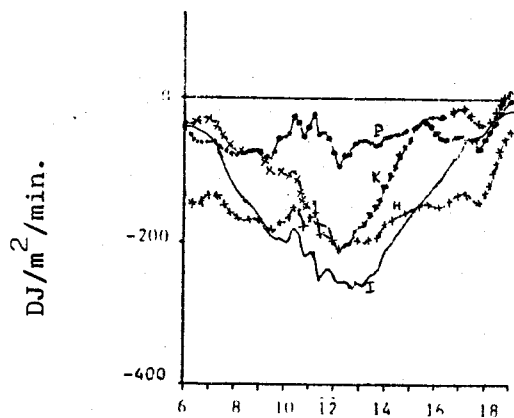


Fig. II.14. Día muy claro de verano. Aumento de turbidez por la tarde. $\beta = 43^\circ$; AC = SUR

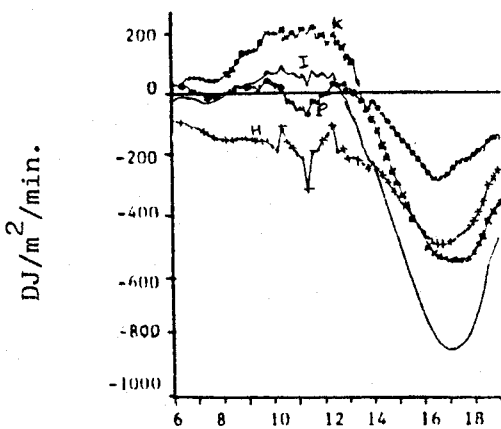


Fig. II.15. Día muy claro de verano. aumento de turbidez por la tarde. $\beta = 90^\circ$; AC = ESTE

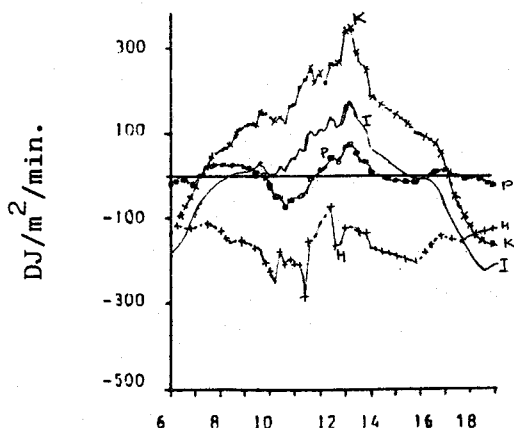


Fig. II.16. Día muy claro de verano. aumento de turbidez por la tarde. $\beta = 90^\circ$; AC = NORTE

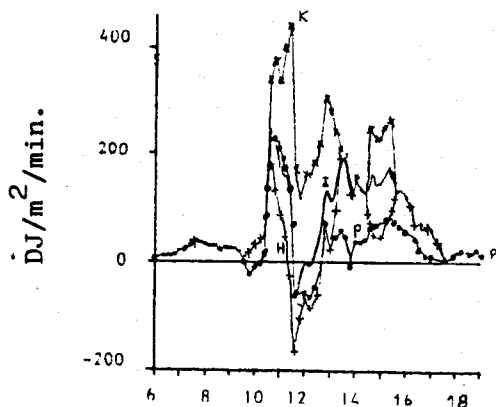


Fig. II.17. Día de verano, con bruma y turbidez elevada. Sólo había exposición directa a mediodía.

$\beta = 90^\circ$; AC = SUR

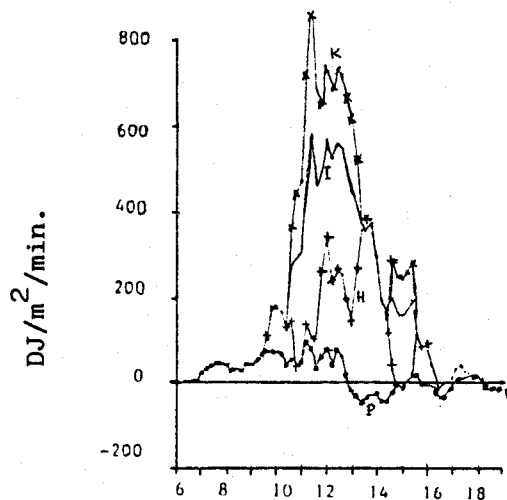


Fig. II.18. Día de verano con bruma y turbidez elevada. Sólo había exposición directa a mediodía.

$\beta = 90^\circ$; AC = NORTE

A partir del análisis de las tablas II.3 a II.5 y de las Figuras II.7 a II.18, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

1. El modelo isótropo resulta totalmente inadecuado para aplicaciones que requieren una simulación dinámica. Ello se deduce de la Fig. II.10, donde los errores generados por este modelo exceden el 35% de la energía total recibida a mediodía. Los restantes modelos se comportan mejor, al menos en orientación Sur.

2. El modelo de Klucher, sobreestima en la cara Norte de una forma excesiva. El motivo de ello, hay que buscarlo en la propia estructura de la ecuación que da la irradiación - difusa horaria sobre cualquier plano. En la ecuación de Klucher, se añaden dos factores f_1 y f_2 al término isótropo que son mayores que la unidad, salvo en ocasiones especiales que son iguales a la unidad. Esto puede observarse a partir de -

$$f_1 = 1 + F \cdot \sin^3 (\beta / 2) \text{ y } f_2 = 1 + F \cos^2 i \cdot \cos^3 \theta_z.$$

Cuando i y θ_z sean distintas de 90° , en cuyo caso $f_2 > 1$. Sólo si $i = 90^\circ$ ó $\theta_z = 90^\circ$, f_2 vale la unidad. A su vez, f_1 siempre será mayor que uno, salvo para superficies horizontales, donde $f_1 = 1$, por otra parte, recordando la definición de F , este parámetro siempre es positivo. Los valores sobreestimados del modelo Klucher, pueden observarse en las Figuras II.13 y II.18, respectivamente.

3. Tanto el modelo de Hay como el de Klucher, vienen expresados en función de un índice de anisotropía. Este parámetro es función del cociente entre la irradiación directa y la global recibida en la superficie de la tierra. El modelo de Pérez, utiliza un segundo parámetro que tiene en cuenta la exposición difusa total recibida sobre la superficie terrestre. La importancia de este segundo parámetro se observa en los resultados de la Figura II.11 y en menor grado en las Figuras II.12 y II.18. En el día cubierto de invierno no había prácticamente exposición directa antes de las 11 a.m. y después de las 2 p.m., y la difusa era importante. Sólo el modelo de Pérez se hace notar claramente del modelo isótropo durante estos días, cubierto y parcialmente cubiertos, y fue capaz de tener en cuenta la existencia de la anisotropía de la radiación difusa.

4. La ausencia de horizonte brillante en el modelo de Hay es notable en días claros para superficies no orientadas al Sur. Figuras II.8, II.15 y II.16, donde el modelo de Hay subestima la irradiación difusa.

La estructura de la ecuación de Hay es también responsable del error generado para cualquier orientación en días claros y alturas del sol elevadas, como se observa en la Fig. II.14. De hecho, cuando $\cos i / \cos \theta_z$ se hace más pequeño que $(1 + \cos \beta) / 2$, el modelo de Hay genera valores más pequeños que el modelo isótropo de manera sistemática, ya que de :

$$Hds = Hdh \cdot K \cdot \underbrace{(\cos i / \cos \theta_z)}_a + (1 - K) \underbrace{((1 + \cos \beta) / 2)}_b,$$

cuando : $\cos i / \cos \theta_z$ es menor que $(1 + \cos \beta) / 2$, resulta:

$$Hds = Hdh \cdot b + K (a - b)$$

y al ser $a < b$, el término Hds de Hay siempre es menor que el término Hds del modelo isótropo.

5. El modelo de Klucher tiene en cuenta el brillo del horizonte, pero la ecuación desarrollada por Temps, que es en la que se basa Klucher, para días claros no diferencia la importancia relativa de este término y el brillo circunsolar. Se ha demostrado (19) que para atmósferas turbias, el brillo circunsolar es con mucho el efecto dominante, mientras que el brillo del horizonte se hace notar más en atmósferas claras (atmósfera de Rayleigh).

6. Una última limitación del modelo de Klucher, que no la posee ni el de Hay ni el de Pérez, es que para planos con orientación ESTE, y las horas tempranas, existe un límite superior para el valor que proporciona el modelo Klucher. El valor máximo permitido es de 2.7 veces el valor proporcionado por el modelo isótropo. Esto se deduce examinando los factores f_1 y f_2 del modelo. Así, para $\beta = 90^\circ$, $\theta_h = 0$; $F = 1$, e $i = 0^\circ$, -
 $f_1 = 1 + F \cdot \sin^3 \beta / 2 = 1.3539$.

$$f_2 = 1 + F \cos^2 i \cdot \cos^3 \theta_z = 2;$$

así, $f_1 \cdot f_2 = 2.7$; $F = 1$ indica que toda la energía recibida en este instante es prácticamente debida a la componente directa.

En realidad, este factor 2.7 representa el límite máximo del modelo de Klucher sobre el modelo isótropo.

II.1.5.- Conclusiones finales sobre el comportamiento de los modelos

- En conjunto, el modelo de Hay proporciona mejores resultados que el modelo Klucher, excepto para cielos muy claros cuando la carencia de horizonte brillante en el modelo de Hay, origina que éste subestime la difusa para superficies no orientadas al sol o para pequeñas elevaciones solares.

- El modelo de Klucher, debido a que sólo genera valores que están comprendidos entre 1 y 2.7 veces el modelo isótropo y a que el término del horizonte brillante es la causa de la frecuente sobreestimación para superficies no orientadas al sol, proporcionando mayores errores para las orientadas al NORTE, ESTE y OESTE, mientras que tiene un mejor comportamiento estimativo que el de Hay cara al SUR, para todo el período medido.

- Para cualquier caso, el modelo de Pérez es el que mejor estima, seguido por el de Hay y el de Klucher. Esto último confirma los resultados de A. Lebru (17), en cuanto que el modelo de Willmott (Hay) se comporta mejor que el de Klucher.

- El hecho de que el modelo de Pérez pueda tener en cuenta la difusa anisótropa cuando hay poca o ninguna radiación

directa en la superficie terrestre, representa una notable ventaja, especialmente en climas donde el cielo está con frecuencia brumoso o bien cubierto con nubes de muy pequeño espesor y que transmiten algo la directa. En este sentido, la ventaja que presenta sobre los demás modelos es notable.

No obstante, el modelo de Pérez, presenta también algunos defectos que convendría tener en cuenta:

1. Se basa en un corto período de tiempo de medidas, en los que se han establecido los parámetros del modelo F_1 y F_2 .
2. En el cálculo de la difusa inclinada en cualquier localidad o bien se utilizan los parámetros dados por F_1 y F_2 o se necesita su determinación. Ello supone tener medidas de global en diferentes planos inclinados y de directa, en un período al menos igual o superior al empleado por Pérez. Esto no es fácil.
3. Por otra parte, si se emplean los parámetros de Pérez, se cae en ciertos errores debido a que es fácil tomar F_1 y F_2 de un intervalo (ϵ , Hdh) cuando en realidad estamos en otro intervalo. Es decir, se produce un desplazamiento de los intervalos.

Por lo dicho, serían necesarias mejoras en el modelo de Pérez, dado en general su buen comportamiento estimativo respecto de los otros. Para ello, sería conveniente:

1. Disponer de un sistema de medida, capaz de registrar la radiación difusa del cielo en cualquier orientación..

Con ello se podría establecer unos mapas de distribución de difusa en función del acimut de la superficie con relación al sol y de la inclinación.

Sería una buena forma de poder evaluar con precisión los parámetros F_1 y F_2 .

2. Disponer de una red de estaciones más amplias para verificar la universalidad del modelo.
3. Conseguir funciones analíticas de F_1 y F_2 para que la aplicación del modelo sea más factible. El no usar los parámetros F_1 y F_2 calculados con absoluta precisión, da lugar a los errores que el propio Pérez detecta en sus ensayos.

II.2.- Introducción al estudio de correlaciones entre la irradiación solar difusa horizontal y la irradiación global horizontal.

El cociente entre la irradiación difusa horizontal y la irradiación global horizontal están fuertemente correlacionadas con el cociente entre la irradiación global horizontal y la extraterrestre horizontal.

En este apartado se hace un análisis entre este tipo de magnitudes, desarrolladas por algunos investigadores y que han destacado en la bibliografía, en estos últimos años. Algunas de estas correlaciones, han proporcionado buenas estimaciones de la irradiación difusa, dependiendo del lugar y condiciones de cielo donde se han aplicado, pero en general y como se estudiará más adelante, con relaciones sólo de este tipo de datos, tampoco se pueden esperar resultados demasiado satisfactorios.

Estos algoritmos, los podemos clasificar en función del tipo de datos empleados para su elaboración:

Valores horarios:

- Orgill-Hollands, Erbs, C. Spencer, Boes et al., Iqbal, Bugler, Bruno.

Valores diarios:

- Liu-Jordan, Collares-Pereira, Ruth-Chant, Munner-Hawas.

Valores diarios promedios mensuales:

- Liu-Jordan, Collares-Pereira, Munner, Page, Iqbal.

II.2.1.- Correlaciones horarias.

Para muchos propósitos de investigación, por ejemplo, en simulaciones matemáticas de procesos de energía solar, se necesitan como mínimo valores horarios de irradiación difusa y global horizontales.

Los valores horarios de irradiación global horizontal se están registrando actualmente en muchas estaciones de países industrializados del mundo. Estos datos se registran en cintas magnéticas para después poder utilizarse con comodidad en los computadores. Sin embargo, como ya se ha mencionado, aunque los valores horarios de irradiación global se registran en muchos lugares, los de irradiación difusa se registran en muy pocos sitios. Por esto, es necesario desarrollar algoritmos que estimen la componente difusa horaria horizontal a partir de los datos de irradiación global horaria sobre superficie horizontal.

El valor de la radiación difusa depende tanto de la altura del sol como de la cantidad de nubes que existen en un instante determinado, además de otros parámetros meteorológicos, como aerosoles y tamaños de éstos, espesor de agua - precipitable, etc.

El efecto de la nubosidad es el de incrementar la radiación difusa, aunque también influye la distribución geométrica de las nubes en relación a la radiación directa, es decir, a la posición del sol. El problema aparece complicado, y por ello se han desarrollado correlaciones entre K_t , cociente entre el valor horario de irradiación global horizontal y la irradiación extraterrestre horizontal frente a K_d , cociente entre la difusa horaria horizontal y la global horaria horizontal. En algunos casos, en lugar de K_d se ha utilizado K_{do} , cociente entre la irradiación horaria difusa horizontal y la extraterrestre horaria horizontal.

En todos los casos, se debería tener en cuenta, al menos la altura del sol, pero en general, se ha omitido por ser más compleja la utilización de este nuevo parámetro. Sólo Bugler e Iqbal han propuesto este tipo de correlaciones horarias K_{do} , K_t en función de la altura solar.

II.2.1.1.- Orgill-Hollands.

Esta correlación (20), está basada en datos medidos durante cuatro años en Toronto, Canadá (43° 48' N). La radiación difusa horizontal se midió con un piranómetro y su correspondiente banda de sombra.

La correlación se da por medio de tres ecuaciones, en función del valor que tenga en una hora, el parámetro

Kt. Estas ecuaciones son:

$$K_d = 1.0 - 0.249 K_t \quad \text{si} \quad 0 < K_t \leq 0.35$$

$$K_d = 1.577 - 1.84 K_t \quad \text{si} \quad 0.35 < K_t \leq 0.75$$

$$K_d = 0.177 \quad \text{si} \quad K_t > 0.75$$

En el intervalo 0.35 , 0.75 se incluye el 62% de los - datos medidos en el período de los 4 años. En el de 0 a 0.35 el 32.4% de los datos y para valores de Kt superior a 0.75 se inclu^{ye} el 5.6% .

Hacen notar estos investigadores que en el rango $K_t > 0.75$ se representan - períodos claros con alguna nubosidad que no obstruyen el sol, pero donde las nubes pueden hacer un efecto lente, actuando como concentrador de radiación difusa. El efecto puede ser tan fuerte que han sido observados valores instantáneos de radiación que exceden el valor de la constante solar. La dirección de esta radiación reflejada no es la directa y por lo tanto se registra como difusa. Por ello, no se puede considerar a la bóveda celeste como una distribución uniforme. Debido a la limitada frecuencia de datos de este rango y a la naturaleza impredecible de la reflexión en nubes, se recomienda que se utilice un valor constante de K_d igual a 0.177.

II.2.1.2.- Erbs et al.

Debido a que las correlaciones de Orgill-Hollands fueron obtenidas para una latitud elevada, Erbs (21), revisa el trabajo anterior con cinco estaciones U.S.A., con latitudes comprendidas entre 31° y 42° N.

En cada estación de medida se registraron valores hora- rios de irradiación directa y de global horizontal. La componen

te difusa fue calculada a partir de los valores anteriores. El período registrado estaba comprendido entre uno y cuatro años, según la estación de medida. El período máximo de medida correspondió a Albuquerque con cuatro años medidos, y el mínimo a Livermore con 15 meses.

La correlación de Erbs viene dada por las siguientes expresiones:

$$K_d = 1.0 - 0.09 K_t \quad , \quad 0 < K_t \leq 0.22$$

$$K_d = 0.9511 - 0.1604 K_t + 4.388 K_t^2 - 16.638 K_t^3 + 12.336 K_t^4 \quad \text{si} \quad 0.22 < K_t \leq 0.80$$

$$K_d = 0.165 \quad , \quad K_t > 0.80$$

II.2.1.3.- Spencer, C.

Spencer (21) estudia la dependencia latitudinal sobre las correlaciones horarias, ya que en lo concerniente a la radiación media diaria, la latitud parece tener influencia sobre ella, debido a que cuando la latitud aumenta, el promedio de la masa de aire también lo hace.

Spencer propone la ecuación siguiente:

$$K_d = a - b K_t \quad , \quad 0.35 \leq K_t \leq 0.75$$

Los coeficientes a y b dependen de la latitud, y valen:

$$a = 0.940 + 0.0118 L$$

$$b = 1.185 + 0.0135 L$$

donde L, es la latitud en grados. Estos parámetros se incrementan cuando lo hace la latitud.

Para valores de K_t mayores de 0.75, K_d se mantiene constante.

Estas correlaciones fueron obtenidas con datos de cinco estaciones en Australia, y los parámetros a y b son válidos para latitudes comprendidas entre 20° - 45° Sur.

II.2.1.4.- Boes.

Boes (23), obtiene unas correlaciones basadas en un año de medidas en tres estaciones U.S.A., con latitudes comprendidas entre 35° - 42° N.

La correlación presentada por Boes, tiene en cuenta la altura solar y esto lo hace diferente de las estudiadas hasta ahora.

Debido a que las medidas registradas eran de directa y de global, las correlaciones presentadas son:

$$I_n = 400 \quad \alpha \leq 10^\circ \quad , \quad Kt > 0.5$$

$$I_n = -520 + 1800 Kt \quad , \quad 0.3 \leq Kt \leq 0.85$$

$$I_n = 1000 \quad Kt > 0.85$$

donde I_n , es la irradiancia normal, medida por el periheliómetro en W/m^2 , y $\alpha \leq 10^\circ$ junto a $Kt > 0.5$ representa alturas pequeñas del sol y nubes brillantes. En el rango $Kt > 0.85$, se representan cielos prácticamente sin nubes.

Una vez calculado I_n si se desea obtener H_{Dn} se hace el cambio de unidades necesario:

$$I_n \left(\frac{W}{m^2} \right) \times 3.6 = H_{Dn} \left(\frac{kJ}{m^2 \cdot h} \right)$$

suponiendo que en dicha hora se mantiene constante la radiación recibida. Al mismo tiempo, $H_{Dh} = H_{Dn} \cdot \cos i$ y $H_{dh} = H_{gh} - H_{Dh}$.

II.2.1.5.- Iqbal.

En el trabajo desarrollado por Iqbal (24), la altura del sol tiene una importancia destacada.

El cielo lo clasifica en 3 categorías, en razón de que esté totalmente cubierto, parcialmente cubierto y despejado. Parece natural que la altura del sol juegue un papel preponderante en función del tipo de cielo que tengamos. Por ello, sin olvidar esto, Iqbal desarrolló una correlación horaria entre K_{do} y K_t con datos de dos estaciones francesas y tres canadienses.

Las latitudes de las estaciones estaban comprendidas entre 43° y 53° N y el período de medida fue al menos de 9 años.

El resultado de la correlación de Iqbal, fue expresado por medio de unas gráficas que se observan en la Fig. II.19, si bien se le podía haber hecho un ajuste a los pares de valores correspondientes K_{do} , K_t .

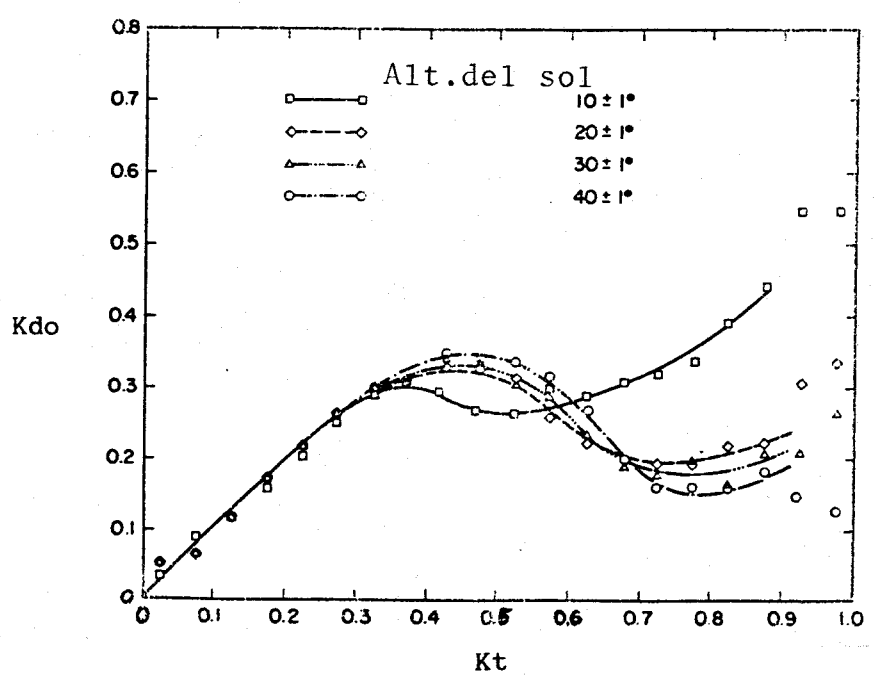


Fig. II.19. Variación de la irradiación difusa horaria en función de la global horaria como función de la altura del sol.

La correlación de la Fig. II.19 la podemos dividir en tres regiones:

Cielo cubierto : ocurre aproximadamente cuando $K_t < 0.35$. En esta zona, la altura del sol no influye sobre el cociente $K_{do} = H_{dh}/H_{oh}$ que se incrementa linealmente con K_t .

Cielos parcialmente cubiertos: por encima de K_t igual a 0.35 empieza a aparecer el efecto de la altura del sol. Al principio de esta zona, el valor de K_{do} aumenta ligeramente con el incremento de K_t , comenzando de nuevo a decrecer a medida que el cielo se hace más claro, alcanzando un valor mínimo. El valor de K_t en el cual se alcanza un K_{do} mínimo varía con la altura del sol.

También se observa que el valor máximo de K_{do} varía con la altura solar, disminuyendo éste para una altura del sol de 10° de una forma considerable comparado con las otras alturas.

Vemos que cuando se hace más claro el cielo, K_t aumenta y K_{do} disminuye, hasta alcanzar el valor mínimo ya mencionado.

Cielos claros: corresponde a la zona detrás de la cual K_{do} alcanza el valor mínimo para una altura del sol determinada. En esta zona, K_{do} vuelve a incrementarse nuevamente al aumentar K_t , dando para alturas bajas del sol un alto porcentaje de difusa, sobre todo para 10° de elevación.

En condiciones de cielos cubiertos y parcialmente cubiertos, las alturas inferiores a 30° tuvieron un marcado efecto sobre K_{do} . Sin embargo, para alturas superiores a 30° , la influencia sobre la fracción de difusa, K_{do} , fue mínima.

Iqbal no dibujó las gráficas de las correlaciones K_d , K_t porque en ellas no se ponía de manifiesto claramente la influencia de la altura y optó por K_{do} , K_t .

Debemos decir que para $K_t > 0.7$, las gráficas deben tomarse como orientación de un resultado y no tomarlos definitivamente como válidos.

El autor aconseja desarrollar este tipo de trabajo con datos obtenidos para alturas del sol más elevadas de los 40° , además de insistir en la investigación para alturas entre 10° y 20° en cielos despejados, donde no aclara el resultado obtenido.

II.2.1.6.- Bugler.

Bugler (25), estudiando los datos medidos de irradiación difusa horaria y global horaria en Highett (Australia) durante 1966, piensa que una correlación entre la irradiación solar difusa horaria, la altura del sol, la atenuación atmosférica y el índice de nubosidad podría mostrarse muy fructífero.

Dos índices de nubosidad utilizó Bugler como argumento de numerosas gráficas en la investigación de la correlación entre la difusa y global : 1) cociente entre H_{gh} y H_{oh} , 2) cociente entre H_{gh} y H_{ghc} para cielo claro.

También la altura del sol fue otro parámetro importante.

La Figura II.20, representa los mejores ajustes obtenidos para varias alturas del sol.

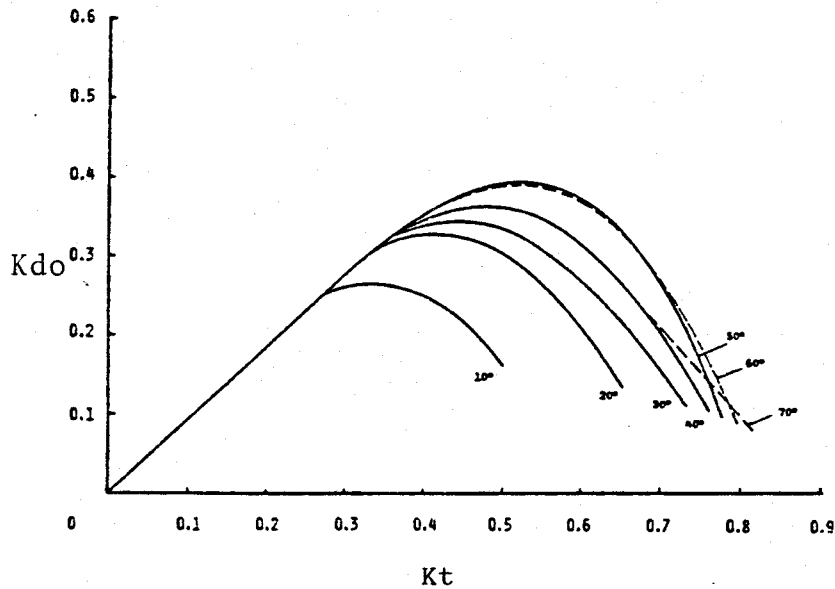


Fig. II.20. Curvas K_{do} , K_t para distinta elevación del sol.

Comenta Bugler que lo más destacado de la Fig. II.21 es la buena correlación que existe entre la difusa y la global para cielos cubiertos.

Por un ajuste de mínimos cuadrados, obtiene que para $0 < K_t \leq 0.35$, $H_{dh} = 0.94 H_{gh}$

El hecho de que H_{dh} no sea igual a H_{gh} se debe a las medidas realizadas por el piranómetro con anillo sombreado. Si se hubiese medido la difusa con un pirheliómetro cuando tenemos cielo cubierto, la H_{dh} sería igual a H_{gh} , y el cociente tiende a la unidad.

Es importante por la repercusión posterior en nuestro trabajo, observar las Figs. II.21 a II.23 de K_{do} frente a K_t para alturas de 10° y 30° , respectivamente.

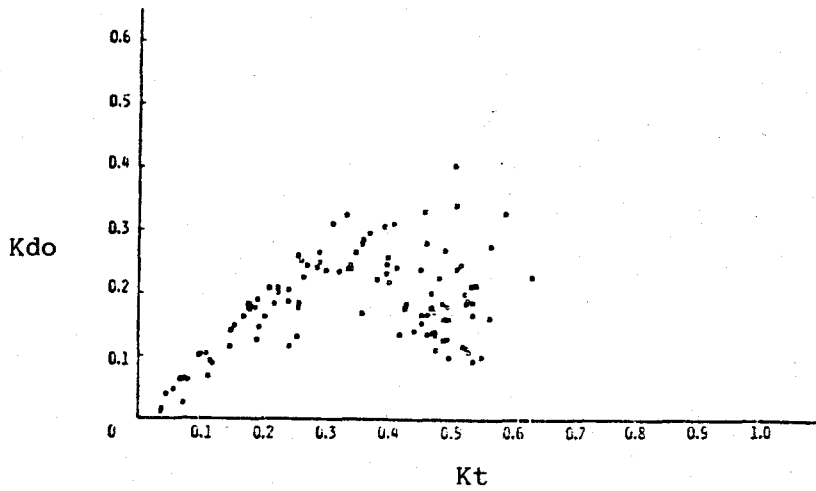


Fig. II.21. K_{do} frente a K_t para una elevación de 10° .

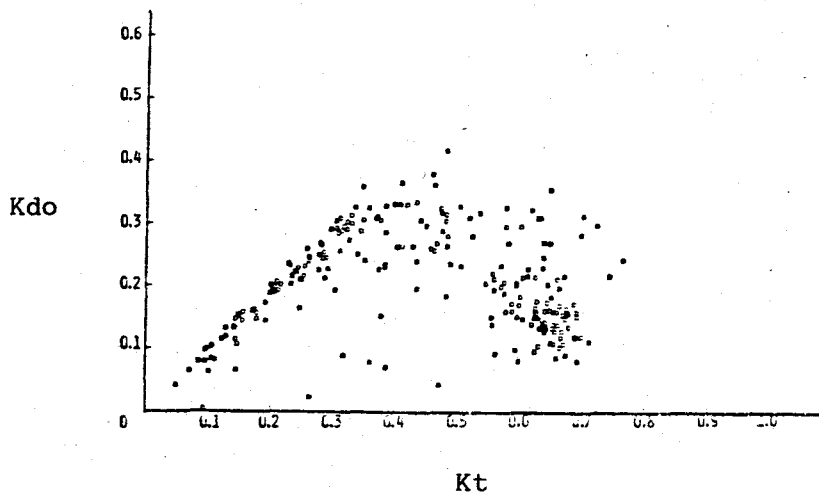


Fig. II.22. K_{do} frente a K_t para una elevación de 20° .

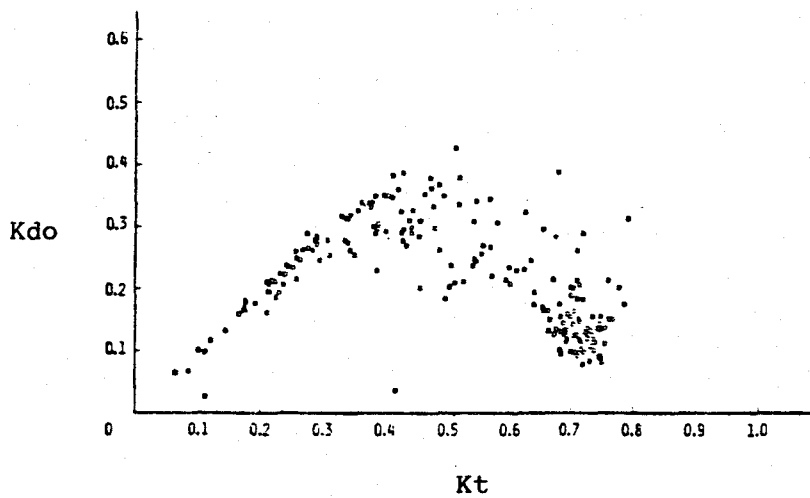


Fig. II.23. K_{do} frente a K_t para una elevación de 30° .

Se observa en estas Figuras, dispersiones significativas en torno a un mismo valor de K_t , obteniendo valores muy diferentes de K_{do} , sobre todo a partir de $K_{do} > 0.35$.

De otro lado, las Figs. II.24 a II.27 representan $K_d = \frac{H_{dh}}{H_{gh}}$ frente a $K_t' = H_{gh}/H_{ghc}$, siendo H_{ghc} la irradiación global horizontal obtenida para atmósfera clara y distintas elevaciones del sol.

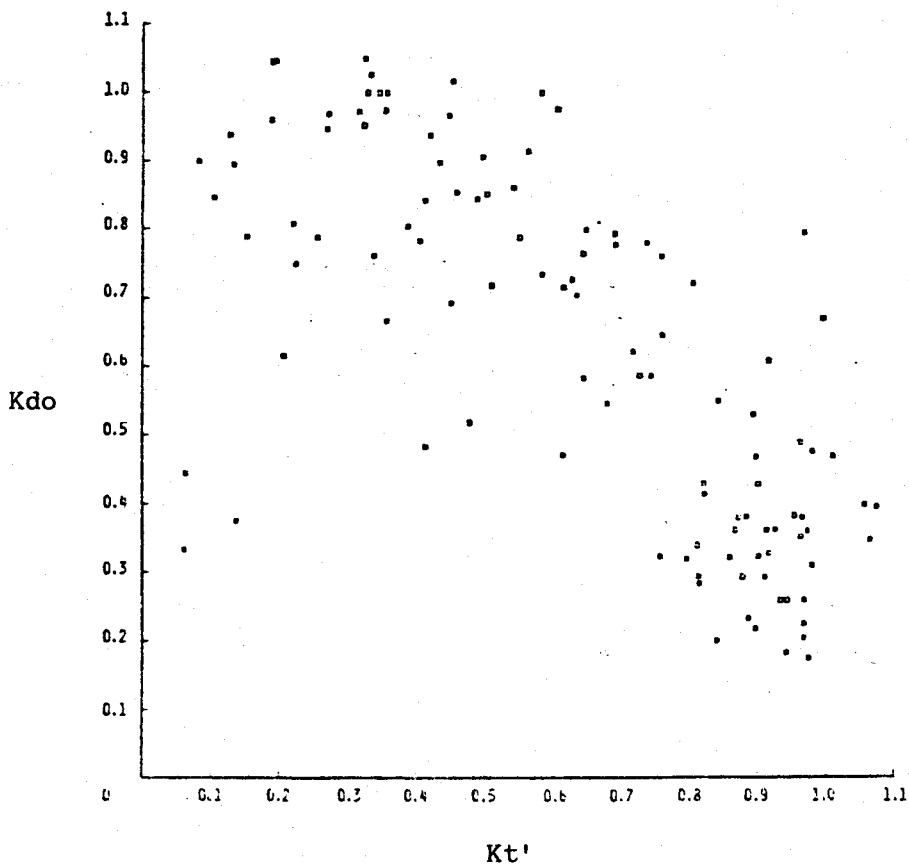


Fig. II.24. K_d frente a K_t' para una elevación de 10°

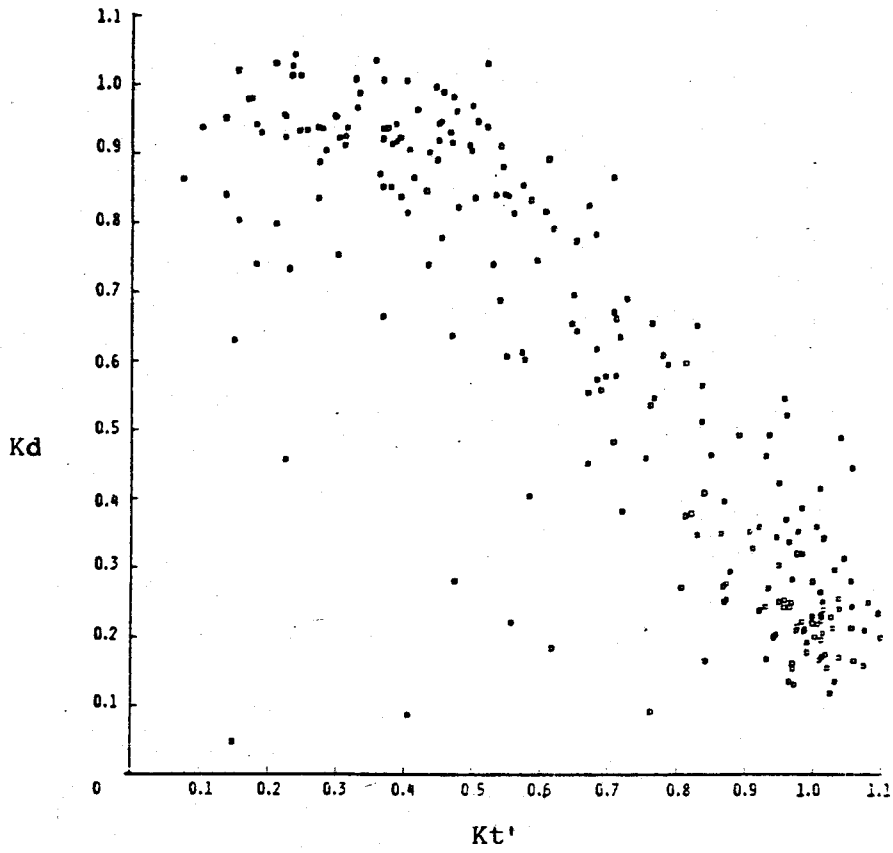


Fig. II.25. K_d frente a K_t' para una elevación de 20° .

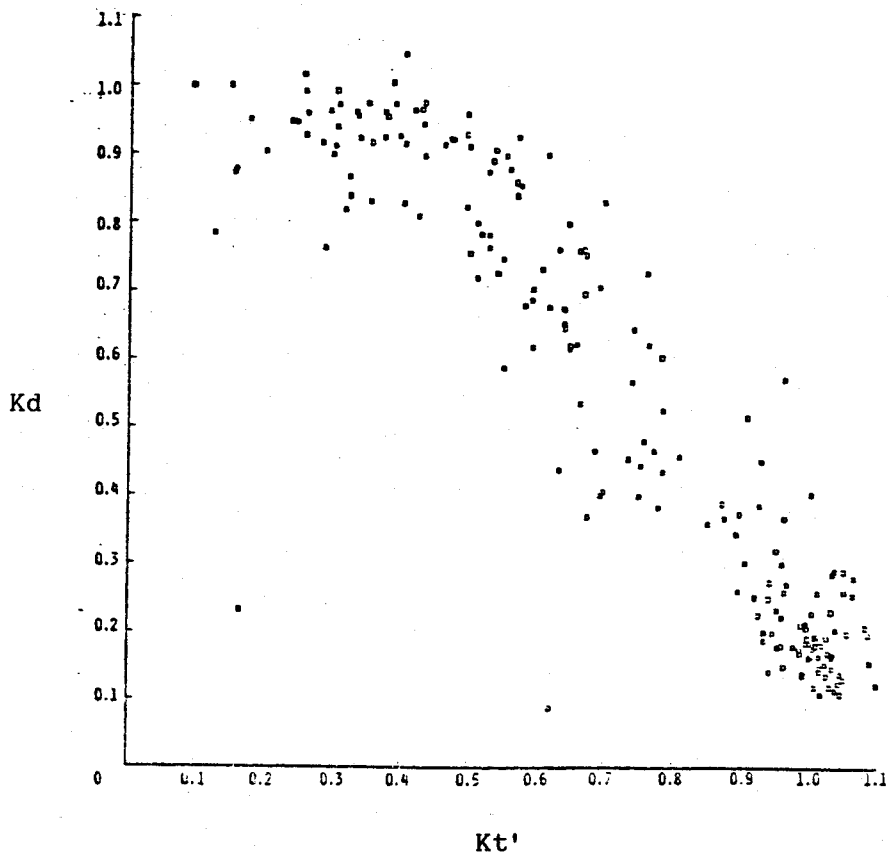


Fig. II.26. K_d frente a K_t' para una elevación de 30° .

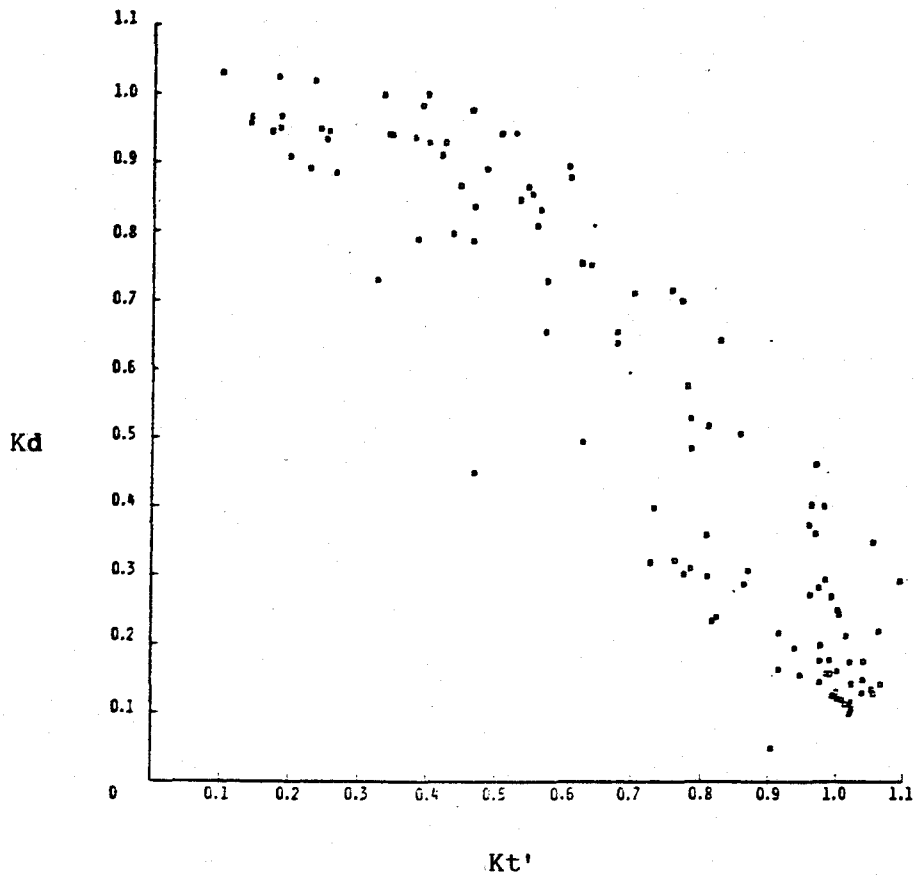


Fig. II.27 K_d frente a K_t' para una elevación de 40° .

El hecho de correlacionar K_d frente a K_t' y utilizar la irradiancia global horizontal para cielo claro es una de las originalidades de la correlación obtenida por Bugler.

Los resultados de los ajustes pueden verse en las Figs. II.28 y II.29.

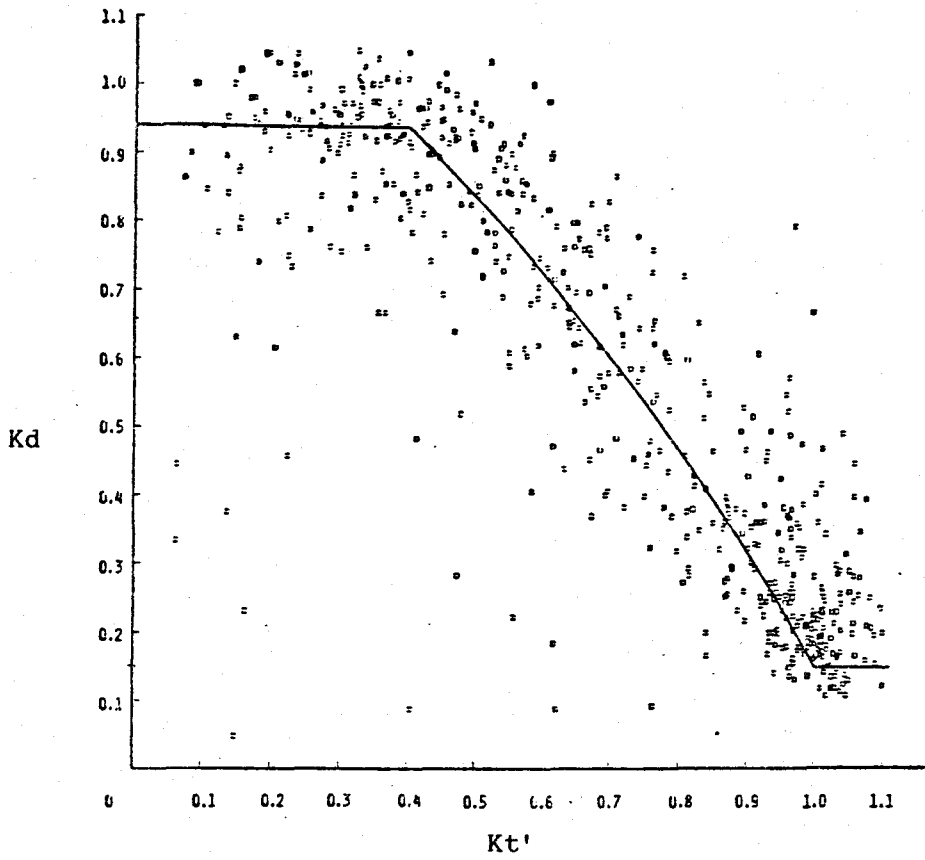


Fig. II.28. Ajuste Kd frente a Kt' para alturas de 10° , 20° y 36° .

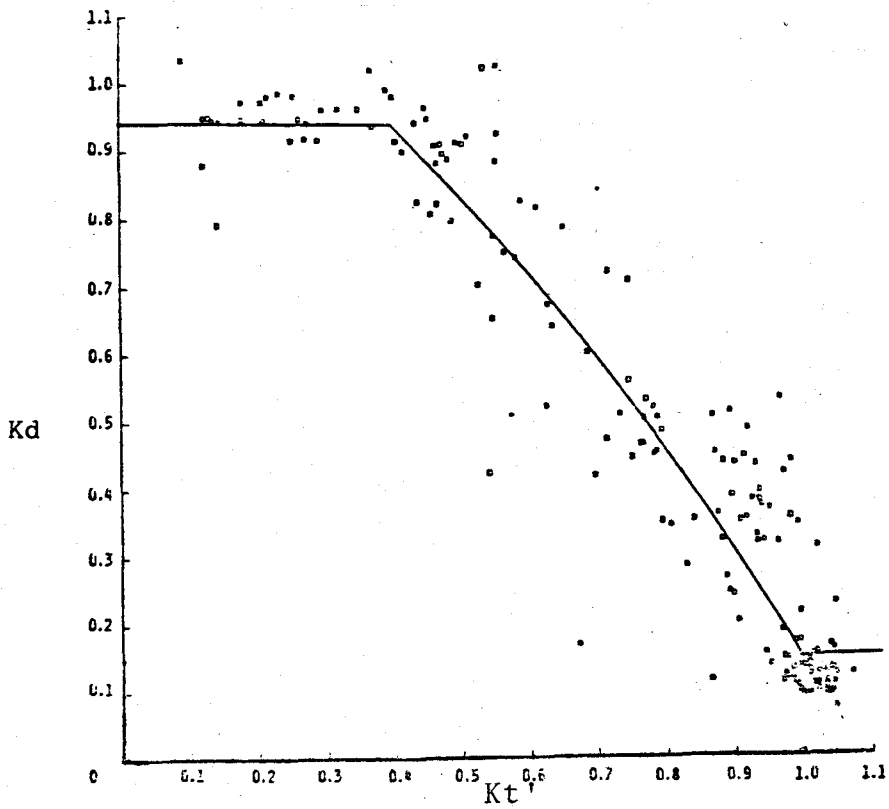


Fig. II.29. Ajuste Kd frente a Kt' para alturas de 50° , 60° y 70° .

Las ecuaciones que propone Bugler siendo $Kt' = \frac{Hgh}{Hghc}$ y

$$Kd = \frac{Hdh}{Hgh} \text{ son:}$$

$$Kd = 0.94 \quad \text{si} \quad 0 < Kt' \leq 0.4$$

$$Kd = \frac{1.29 - 1.19 Kt'}{1.00 - 0.334 Kt'} \quad \text{si} \quad 0.4 < Kt' \leq 1.0$$

$$Kd = 0.15 \quad \text{si} \quad Kt' > 1$$

Lo que no dice Bugler en su trabajo es cómo obtener el valor de Hgh para cielo claro. Una forma de hacerlo, propuesta por Perrin de Brichambaut (26) es:

$$Hghc = 1080 \cdot (\sin \alpha)^{1.22}$$

$$\text{donde } \sin \alpha = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

II.2.1.7.- Bruno.

Con datos de Hamburgo de 1973 y 1974, y utilizando un período de medidas equivalente a 4200 horas por año, Bruno (27) establece una correlación entre Kdo y Kt que en vista a la distribución de los pares de puntos experimentales toma la forma:

$$Kdo = a Kt + b \sin (c Kt)$$

$$\text{donde } a = 0.31; \quad b = 0.139 \quad \text{y} \quad c = 4.62.$$

Dadas las dispersiones que se encuentra el autor en torno a un mismo valor de Kt, propone la ecuación anterior para calcular el Kdo promedio horario de un año. El Kdo que debe utilizarse para valores horarios en un día cualquiera debe ser:

$$Kdo = \bar{Kdo} + \left(1 - \frac{n_{\text{aleatorio}}}{50}\right) \sigma Kdo$$

donde

$$\sigma Kdo = \bar{Kdo} \left(\frac{\rho}{100}\right) \cdot Kt \cdot \left(\frac{Kt - \beta}{Kt - \alpha}\right)$$

siendo $n_{\text{aleatoria}}$, es un número aleatorio generado entre 0 y 100, $\rho = 81$; $\beta = 0.942$ y $\alpha = 1.09$ constantes calculadas para Hamburgo.

Bruno no encuentra tendencia estacional de los datos y comenta que las variaciones observadas de Kdo en torno a un mismo valor de Kt son dependientes de otros parámetros meteorológicos, — además de Kt, y que estas variaciones de Kdo pueden ser modeladas mediante procesos estocásticos.

II.2.2.- Correlaciones diarias.

Con este tipo de correlaciones se trata de estimar el valor de Hdh para un día en función del valor de Hgh. El procedimiento empleado es establecer correlaciones entre $Kt = Hgh/Hoh$ y $Kd = Hdh/Hgh$. Al parámetro Kt se le suele llamar índice de claridad del día, porque en buena medida, mientras más alto sea el valor de Kt, más claro es el día.

II.2.2.1.- Liu-Jordan.

Liu-Jordan (28) fue el primero que desarrolló este tipo de correlaciones. Su estudio consta fundamentalmente de cinco etapas, aunque en este apartado sólo mencionamos dos:

1. Correlación entre la radiación directa y difusa horizontal para un día claro. Obtiene una relación entre los coe--

ficientes de transmisión para la radiación difusa y directa. La base de datos fueron medidas de irradiación directa, global y difusa diarias durante 28 días claros con un total de 149 puntos experimentales.

Las relaciones obtenidas sólo sirven para localidades semejantes a aquellas donde se tomaron las medidas, es decir, han de tener aproximadamente igual, sus coeficientes de albedo, turbidez, etc. La ecuación obtenida toma la forma:

$$Kdo = 0.2710 - 0.2939 KDo$$

siendo Kdo el cociente entre los valores horarios de Hdh y Hoh; KDo es el cociente entre los valores horarios de HDh y Hoh.

2. Resultados gráficos que relacionan la exposición difusa diaria y la exposición global diaria sobre superficie horizontal. El ajuste analítico dado posteriormente a esta gráfica toma la forma:

$$Kd = 1.0045 + 0.04349 Kt - 3.5227 Kt^2 + 2.6313 Kt^3$$

siendo $Kd = Hdh/Hgh$ y $Kt = Hgh/Hoh$

II.2.2.2.- Collares-Rabl.

Collares y Rabl (29) observan que aunque la distribución de la radiación difusa es muy irregular tanto en el tiempo como en el espacio, las características promedio de ella sí mantienen un comportamiento regular. Además, corrigen las medidas efectuadas de la irradiación difusa debido al anillo de sombra, cosa que en las correlaciones de Liu-Jordan no se tuvieron en cuenta, obteniendo unos resultados algo

diferentes a los obtenidos por Liu-Jordan.

Las correlaciones de Collares-Rabl se basaron en medidas de irradiación directa y global horizontal de cinco estaciones en EE.UU.

Los resultados de las correlaciones diarias de Collares-Rabl son:

$$K_d = 0.99 \quad , \quad K_t \leq 0.17$$

$$K_d = 1.188 - 2.272 K_t + 9.473 K_t^2 - 21.856 K_t^3 + 14.648 K_t^4$$

$$0.17 < K_t \leq 0.75$$

$$K_d = -0.54 K_t + 0.632 \quad , \quad 0.75 < K_t < 0.80$$

$$K_d = 0.2 \quad , \quad K_t \geq 0.80$$

II.2.2.3.- Ruth-Chant.

Ruth-Chant (30), utilizando datos de irradiación difusa medida con banda de sombra e irradiación global durante siete años en cuatro estaciones de Canadá, aportan una solución gráfica entre K_{do} y K_t , así como también entre K_d y K_t .

La expresión analítica que ajusta esta correlación entre K_d y K_t es:

$$K_d = 0.98 \quad \text{si} \quad K_t \leq 0.1$$

$$K_d = 0.910 + 1.154 K_t - 4.936 K_t^2 + 2.848 K_t^3 \quad , \\ 0.1 < K_t \leq 0.7$$

Ruth-Chant destacan varios puntos : 1º) aunque el método desarrollado por Liu-Jordan proporcionan excelentes correlaciones, las correlaciones no son aplicables universalmente. 2º) Las -

correlaciones muestran una dependencia latitudinal. 3º) Mientras sea posible deben utilizarse correlaciones locales basadas en el método desarrollado por Liu y Jordan. 4º) Cuando no existe correlaciones locales, la correlación estándar desarrollada por Ruth y Chant puede utilizarse con errores muy pequeños.

De todos estos puntos es de destacar la importancia que tiene el poseer medidas de una localidad para obtener sus propias correlaciones K_d , K_t .

II.2.2.4.- Muneer, T y Hawas M.M.

Con datos de 13 estaciones de medidas de irradiación global y difusa horaria horizontales en la India para un período de 3 años, Muneer y Hawas (31) analizan las correlaciones K_d , K_t diarias, obteniendo los siguientes resultados:

$$K_d = 0.98 \quad , \quad K_t < 0.2$$

$$K_d = 1.014 + 0.47 K_t - 3.622 K_t^2 + 2 K_t^3$$

$$0.2 \leq K_t \leq 0.77$$

$$K_d = 0.16 \quad , \quad K_t > 0.77$$

Encontraron Muneer y Hawas que una función cúbica proporciona un ajuste claramente preciso. Por otra parte, la comparación con otros estudios mostraba que una correlación única no es aplicable para todas las regiones y que cada región posee sus propias características. Aunque las estaciones consideradas tienen diversas latitudes, variaciones climáticas y geográficas, el estudio mostraba que ninguna tenía efecto sobre la correlación.

II.2.3.- Correlaciones diarias promedio mensual.

Con este tipo de correlaciones se trata de obtener la -

irradiación difusa horizontal promedio de un mes, a partir del conocimiento de la irradiación global horizontal promedio de todos los días de un mes. El establecimiento de estas correlaciones supone el tener una serie de medidas de ambas magnitudes durante varios años. Entre estas correlaciones, destacan las de Liu-Jordan y Collares-Rabl.

II.2.3.1.- Liu-Jordan.

Liu-Jordan (28) proporcionan resultados gráficos que relacionan \bar{K}_d , frente a \bar{K}_t . A esta gráfica, en estudios posteriores se le ha ajustado un polinomio de grado 3, que toma la forma:

$$\bar{K}_d = 1.390 - 4.027 \bar{K}_t + 5.531 \bar{K}_t^2 - 3.108 \bar{K}_t^3$$

aplicable fundamentalmente al intervalo $0.3 < \bar{K}_t < 0.7$, siendo \bar{K}_d el cociente entre la irradiación difusa horizontal promedio de un mes y la global horizontal promedio del mes, y \bar{K}_t el cociente entre la irradiación global horizontal promedio del mes y la extraterrestre horizontal promedio del mismo mes, es decir :

$$\bar{K}_d = \bar{H}_{dh}/\bar{H}_{gh} \quad \text{y} \quad \bar{K}_t = \bar{H}_{gh}/\bar{H}_{oh}$$

II.2.3.2.- Collares-Rabl.

Collares-Rabl (29) relacionan \bar{K}_d con \bar{K}_t y con el ángulo horario de salida del sol para un día tipo del mes. Ello implica una dependencia en el cálculo de \bar{K}_d con la época del año. Este tipo de relación es única y no ha sido confirmado en otros trabajos posteriores. La ecuación de Collares-Rabl es :

$$\bar{K}_d = 0.775 + 0.00653 (\bar{\omega}_s - 90) - [0.505 + 0.00455(\bar{\omega}_s - 90) \cdot \cos (115 \bar{K}_t - 103)]$$

$\bar{\omega}_s$ es el ángulo horario de salida del sol para el día tipo del mes, el cual, es una función de la latitud y la declinación, que a su vez es función de la época del año.

II.2.3.3.- Muneer-Hawas.

La correlación propuesta por Muneer-Hawas (31) entre \bar{K}_d y \bar{K}_t es:

$$\bar{K}_d = 1.35 - 1.6075 \bar{K}_t$$

La Figura II.30 muestra una comparación entre los puntos experimentales y las correlaciones propuestas por Collares-Rabl, Liu-Jordan y Page

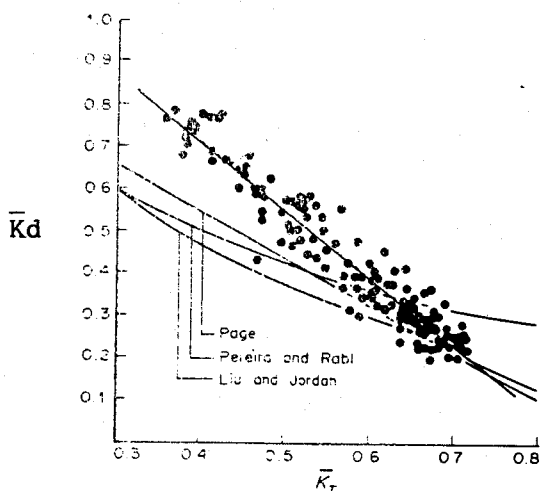


Fig. II.30. Comparación entre las distintas correlaciones diarias promedios mensuales y los valores experimentales para la India.

Como se puede observar, el valor de irradiación difusa que se obtiene con la correlación de Liu-Jordan, Collares-Rabl y Page es inferior al obtenido de los datos experimentales.

II.2.3.4.- Page.

Page (32) obtiene una correlación \bar{K}_d , \bar{K}_t similar a la -

ecuación obtenida por Muneer-Hawas, pero con una estimación de la irradiación difusa algo inferior. La ecuación es:

$$\bar{K}_d = 1.00 - 1.13 \bar{K}_t$$

Esta ecuación ha sido corregida por Iqbal, al utilizar como constante solar 1353 W/m^2 en lugar del antiguo valor utilizado por Page. Por ello, la correlación propuesta por Iqbal es :

$$\bar{K}_d = 0.958 - 0.982 \bar{K}_t$$

aplicable al intervalo $0.3 < \bar{K}_t < 0.6$

II.2.4.- Relaciones entre los valores de la irradiación horaria y diaria promedio mensual.

Debido a la necesidad de conocer en muchos procesos de energía solar los valores de la irradiación en intervalos más cortos que un día, Liu-Jordan (28) y Whillier (33) estudiaron las relaciones entre los valores horarios y diarios de irradiación global y difusa promedio mensual.

Liu-Jordan comprobaron que la relación entre la irradiación horaria extraterrestre y la diaria extraterrestre es la misma que la relación entre la irradiación difusa horaria respecto a la difusa diaria sobre plano horizontal:

$$r_d = \frac{\bar{H}^h_{dh}}{\bar{H}^d_{dh}} = \frac{\bar{H}^h_{oh}}{\bar{H}^d_{oh}} = \frac{\int \cos \omega - \cos \omega_s}{24 \sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s}$$

En esta ecuación, \bar{H}^d_{dh} se obtiene a partir de las correlaciones diarias promedio mensual; ω_s es el ángulo horario de salida del sol para un día tipo del mes y ω es el ángulo horario fijado, teniendo en cuenta que si queremos hallar la irradiación difusa horaria entre las 11 y las 12, hay que tomar el ángulo ho

rario correspondiente a las 11 ½. Como el origen de ángulos se toma a las 12 de mediodía solar, será entonces ½ horas, o lo que es lo mismo -7.5°. De todo esto resulta que la irradiación difusa horaria será:

$$\bar{H}^h_{dh} = r_d \cdot \bar{H}^d_{dh}$$

La Figura II.31 nos muestra las gráficas que dan la distribución horaria de irradiación difusa horaria promedio mensual en función del ángulo horario de salida del sol y de la hora elegida.

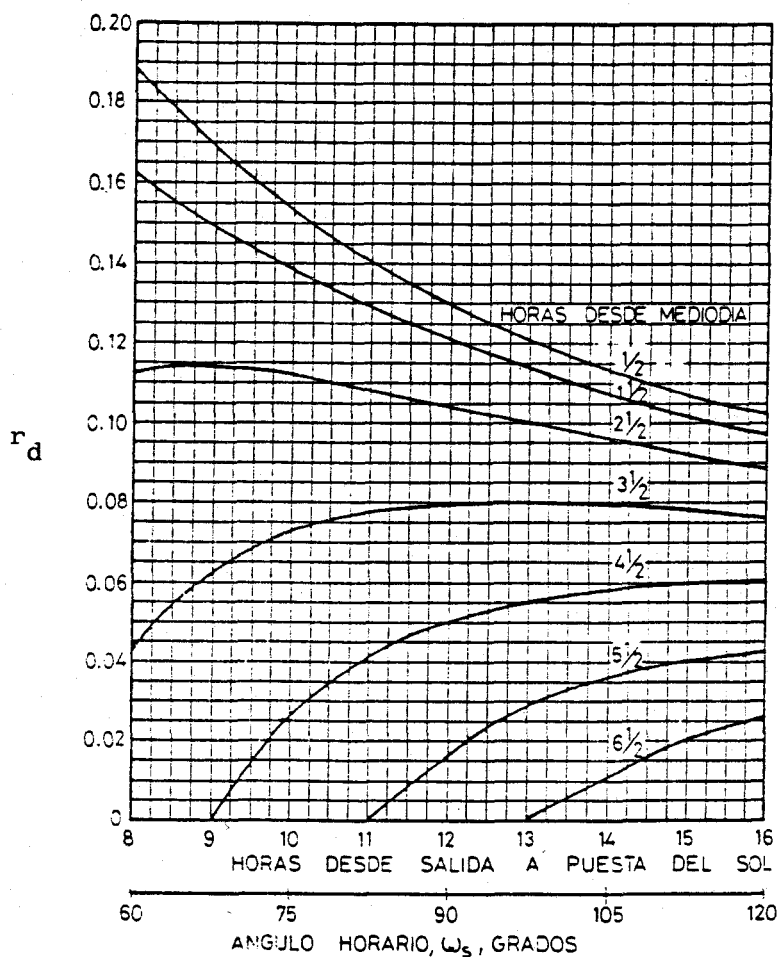


Fig. II.31. Distribución de la irradiación difusa horaria promedio mensual.

Collares-Rabl (29) desarrollaron a su vez una expresión matemática para las gráficas de Whillier (33) que daban la irradiación horaria promedio mensual de irradiación global. Esta expresión es:

$$r_g = \frac{\bar{H}_{gh}^h}{\bar{H}_{gh}^d} = r_d (a + b \cdot \cos \omega)$$

$$\text{donde } r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \omega_s \cdot \cos \omega_s}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin (\omega_s - 60^\circ)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin (\omega_s - 60^\circ)$$

La Fig. II.32 representa las gráficas de Whillier. En ella se observa la distribución de la irradiación global horaria promedio mensual en función del valor de la irradiación global diaria promedio del mes, del ángulo horario de salida del sol y de la hora del día respecto del mediodía solar.

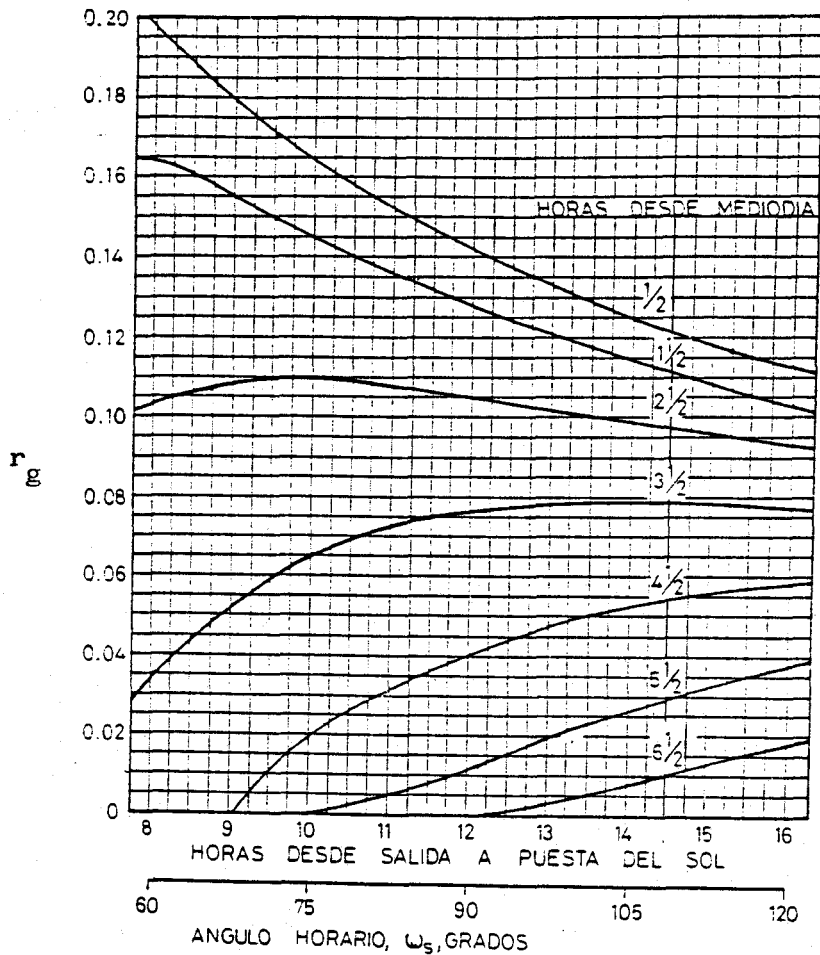


Fig. II.32. Distribución de la irradiación global horaria promedio mensual.

II.3. Comentarios sobre la bondad de los ajustes de K_d , K_t .

Tomando como base de datos medidas de radiación global y difusa horizontales, Smietana (34) y otros han estudiado el comportamiento de una serie de modelos y correlaciones, así como la comparación entre ellos.

Haciendo sus experimentos en días cuyos porcentajes de horas de sol oscilaban entre un 10% y un 90% en diferentes épocas del año, llegaban a las conclusiones siguientes:

1. El cálculo de la radiación incidente sobre superficies inclinadas es correcto si previamente se ha obtenido un valor preciso de la irradiación difusa horizontal, sin precisar el modelo elegido.

2. Las correlaciones entre K_d y K_t tienen una gran dispersión en torno a las regresiones polinómicas calculadas para días muy claros, en cualquier época del año. También para días brumosos, parcialmente brumosos y días claros se observa dispersión de valores de K_d en torno a un mismo valor de K_t .

3. El hecho de esta dispersión de K_d en torno a K_t sugiere que K_d no sea función única de K_t y por ello no puede ser calculada con precisión conveniente la componente difusa, pues a partir de un buen valor estimado de K_d , la irradiación difusa horizontal, H_{dh} , valdría el producto de H_{gh} y K_d .

4. Si en los modelos de cálculo se parte de valores medidos y no estimados de H_{gh} y H_{dh} , la aplicación de los modelos suelen dar resultados aceptables.

Bartoli (35) y otros, utilizando datos de irradiación global y difusa en dos localidades italianas, analizan las correlaciones K_d , K_t , encontrando dos tipos de ajustes analíticos diferentes totalmente satisfactorios.

Al evaluar la irradiación difusa calculada a partir de los ajustes encontrados, sacan las siguientes conclusiones:

1. Los valores estimados de irradiación difusa poseen un error considerable.

2. Los puntos experimentales están perfectamente ajustados desde el punto de vista estadístico.

3. El error cometido en el cálculo de la irradiación difusa no es debido al ajuste sino a la distribución estadística de los

puntos experimentales K_d , dentro de un intervalo elegido de $K_d \pm \Delta K_d$ alrededor del valor medio de \bar{K}_d de este intervalo.

4. Tal dispersión depende de parámetros físicos atmosféricos, como turbidez, vapor de agua, contenido en aerosoles, etc. y ninguna información puede sacarse de estos parámetros solamente de las medidas de irradiación global horizontal, H_{gh} .

II.4. Necesidad de nuevos parámetros en las correlaciones K_d - K_t .

De los análisis de Smietana (34) y Bartoli (35), la coincidencia de ambos en lo referente a que K_d no sea una función única de K_t es absoluta.

Parece natural que el punto fundamental no es ya disponer de modelos isótropos o anisótropos que evalúen la radiación solar sobre superficies inclinadas, sino de disponer de correlaciones idóneas que permitan calcular con precisión las componentes difusa y directa de la radiación solar.

La clave del problema radica en el hecho de que la distribución asimétrica de la irradiación difusa a nivel local hace que sea inadecuado hallar polinomios que relacionen K_d sólo frente a K_t , para usarlos en cualquier condición atmosférica y cualquier época del año. Hasta ahora, sólo se conocen funciones de K_d frente a K_t , pues a lo sumo sólo se dispone de series relativamente largas de medidas de H_{gh} , por lo que a falta de nuevos parámetros medidos y de una profundización en el análisis estadístico es lo que ha existido y se ha podido aplicar.

No cabe duda de que se pueden explorar otras vías, como son los modelos de radiación que utilizan variables meteorológicas (contenido de ozono, de vapor de agua, turbidez, etc.) Esta vía parece hoy -

día casi inexpugnable por no disponer, entre otras cosas, de este tipo - de datos. Por otra parte, cuando se ha intentado algún modelo con estos parámetros, parece que tampoco proporcionan resultados mucho mejores que los modelos actuales de radiación.

Por lo expuesto, podemos llegar a la conclusión de que debemos volcar nuestros esfuerzos en medir irradiación e irradiancia difusa, global en diferentes planos, así como la irradiación directa, e intentar conseguir correlaciones adecuadas que tengan en cuenta los distintos parámetros meteorológicos que definan el estado de la atmósfera en un instante dado, como son: turbidez, espesor de agua precipitable, presión, temperatura, humedad, etc., conjuntamente. Sin embargo, esto supone un esfuerzo costoso en lo económico y de espera en el tiempo, por lo que hemos optado por un análisis estadístico más profundo de lo que se ha venido haciendo hasta ahora de las medidas realizadas. Este nuevo punto de vista de enfocar el problema se expone en el capítulo VI de esta tesis.

CAPITULO III.
SISTEMA DE MEDIDA

CAPITULO III.

SISTEMA DE MEDIDA.

III.1.- Introducción.

Se expone en este capítulo una descripción del tipo de medidas y del equipo que ha servido de base para la elaboración de este trabajo. Dicho equipo se encuentra situado en la azotea L-1 de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla. Se acompañan fotografías que muestran la realidad actual del sistema de medida.

También se describe todo lo referente a la filosofía que encierra el control automático de la instalación y el almacenamiento de datos, para lo cual se adjunta el diagrama de bloques del programa principal que controla el sistema.

Por último, se muestran las medidas correspondientes a un día concreto y las gráficas de irradiancia global horizontal, irradiancia directa y temperatura de ese día.

III.2.- Tipos de medida.

El equipo realiza dos tipos de medida:

a) **Medidas de radiación.**

Radiación global sobre superficie horizontal.

Radiación global sobre superficie inclinada 37°, SUR.

Radiación difusa sobre superficie horizontal con banda de sombra.

Radiación directa sobre plano normal.

Además de estas variables, medidas y registradas se obtienen, mediante un programa de ordenador, las integrales de cada una de ellas.

b) Variables meteorológicas.

Temperatura ambiente.

Velocidad y dirección del viento.

Presión.

Humedad relativa.

III.3.- Descripción del equipo.III.3.1.- Sensores.

Su misión es enviar una señal eléctrica analógica, a --
través de cables coaxiales blindados al canal asignado en el scan
ner (Fotografías 1,2 y 3). Como es lógico, estos aparatos realizan
la lectura de las variables que se miden y son las siguientes:

a) Para variables de radiación

PIRANOMETROS (SOLARIMETROS)	Cte. de Calibración
- KIPP ZONEN CM2-642169	K = 8.37 WRR
- KIPP ZONEN CM5-742260	K = 7.71 WRR
- KIPP ZONEN CM5-742270	K = 6.64 WRR

Estos aparatos utilizan como receptor una pila termoe--
létrica proporcionando una respuesta independiente de la longi--
tud de onda de la radiación incidente. Las uniones de las
soldaduras que están expuestas a la radiación están cubiertas
de un negro selectivo del tipo 3M Velvet. La medida de la
radiación incidente es proporcional a la diferencia de temperatu--
ras que se origina entre la parte negra de la superficie recepto--
ra y la carcasa del instrumento. Es un tipo de piranómetro
muy usado en Europa, conocido con el nombre genérico de Moll-Corc
zynsky.

La diferencia esencial con los piranómetros utilizados

en América, como el fabricado por la casa Eppley, es que en éstos últimos, la medida de la radiación incidente es proporcional a la diferencia de temperaturas que se origina entre las partes negras y blancas del elemento receptor expuesto a la radiación.

Las características de los piranómetros utilizados por nosotros son:

Respuesta (mV/Vm^{-2})	0,01
Estabilidad (%/año)	± 2
Tiempo de respuesta ($1/\lambda$, s)	5
Error de coseno (% a 10° de elevación solar)	+7
Error de azimut (%)	± 2
Dependencia de la temperatura. No compensada (%/ $^\circ\text{C}$)	-0.2
Impedancia (Ω) no compensada	10

PIRHELIOMETROS (ACTINOMETROS)

- EPPLEY NIP -18170EG K = 6.46 WRR
- KIPP ZONEN CM1 -740287 K = 12.25 WRR
- Absoluto de cavidad HF EPPLEY 404

Todas las constantes son en $\text{mV}/(\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$

WRR (referencia radiométrica mundial)

El receptor de nuestro pirheliómetro es de termopila, - compensado en temperatura, sellado herméticamente en una atmósfera de aire seco y con una apertura cubierta por un vidrio de cuarzo circular, con las siguientes características:

Respuesta	0.007 mV/W.m^2
Estabilidad	1%/anual
Constante de tiempo	4 s.

Dependencia en temperatura ambiente (-30° a +40°C)	$\pm 1\%$
Impedancia	200
Apertura	Circular: 5°

b) Para variables meteorológicas

- Termorresistencia de platino Pt-100 calibrada por el INTA. Se alimenta con una fuente de intensidad de 1 mA que el scanner dispone.

- Anemómetro - veleta.

- Transductor electrónico de presión LX180AZ. Calibrado por el INTA. Viene directamente fabricado compensado en temperatura. Se alimenta con una fuente de tensión fabricada por nosotros de 15 ± 0.2 V, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

- Sonda de humedad HNP 214-VAISALA. Calibrado en la propia estación. Viene compensada en temperatura. Se alimenta con dos tensiones, una de 9.5 ± 1.5 V para un calefactor interno y otra de 3.60 ± 0.01 V para la alimentación de la electrónica interna, realizado en nuestro laboratorio, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

III.3.2.- Instrumentos de control.

Para la medida de las magnitudes descritas, hemos empleado un sistema automatizado de adquisición y tratamiento de datos, formado por los siguientes instrumentos (Fotografías 4, 5 y 6).

1. Controlador HP-87 con memoria de 128 K bytes ampliable a 540 K.

Mediante un programa de ordenador especialmente diseñado por nosotros, el controlador realiza las siguientes funciones:

- Supervisa el funcionamiento de todas las interfases.
- Asigna funciones de emisor y receptor de información por el bus de datos.
- Genera las órdenes de control y manda instrucciones de programación a cada aparato.

El controlador debe trabajar como elemento de control, emisor y receptor.

2. Scanner HP-3497A. Recibe las señales que le envía el controlador. Ejecuta las órdenes recibidas, que en resumen son:

- Explora cada canal conectado a los sensores.
- Mide con el microvoltímetro incorporado al propio scanner.
- Realiza las medidas analógicas y las convierte en señal digital.
- Envía al controlador las señales medidas de cada uno de sus canales; el controlador decide, analizados los datos, si debe almacenarse la información enviada por el scanner.

3. Sistema de almacenamiento magnético de discos, HP-82901M. En esta unidad, al final del día, se graba toda la información que se almacenó en la memoria central del controlador HP-87, creándose a continuación nuevos ficheros de datos para poder de nuevo almacenar las medidas de radiación y de variables meteorológicas.

III.3.3.- Instrumentos de tratamiento de datos.

Una vez almacenados los datos en discos magnéticos, se disponen de los siguientes aparatos para poder procesar la información:

1. Microprocesador HP-86 con 128 K bytes.
2. Sistema de impresora HP-82905 B.
3. Plotter HP-7470 A.
4. Sistema de almacenamiento magnético de discos HP-82901 M.

III.3.4.- Esquema de la estación de medida.

Como puede observarse en la Fig. III.1, existen dos unidades de trabajo diferenciadas:

a) La unidad formada por los sensores, el scanner + microvoltímetro y el HP-87.

Esta unidad funciona así durante el día. Por la noche se le incorpora la unidad de disco (Foto 5).

b) La unidad formada por el HP-86, la impresora y el Plotter (Foto 6).

Esta unidad durante el día tiene conectada la unidad de disco.

Ambas unidades se encuentran en todo momento auxiliadas por el sistema de alimentación ininterrumpido (S.A.I.) modelo AMV 24-600-2B55, con objeto de evitar los cortes de corriente y tener una autonomía de unas 3 horas, lo cual supone un tiempo considerable, pues no es frecuente cortes de corriente superiores a 1 hora.

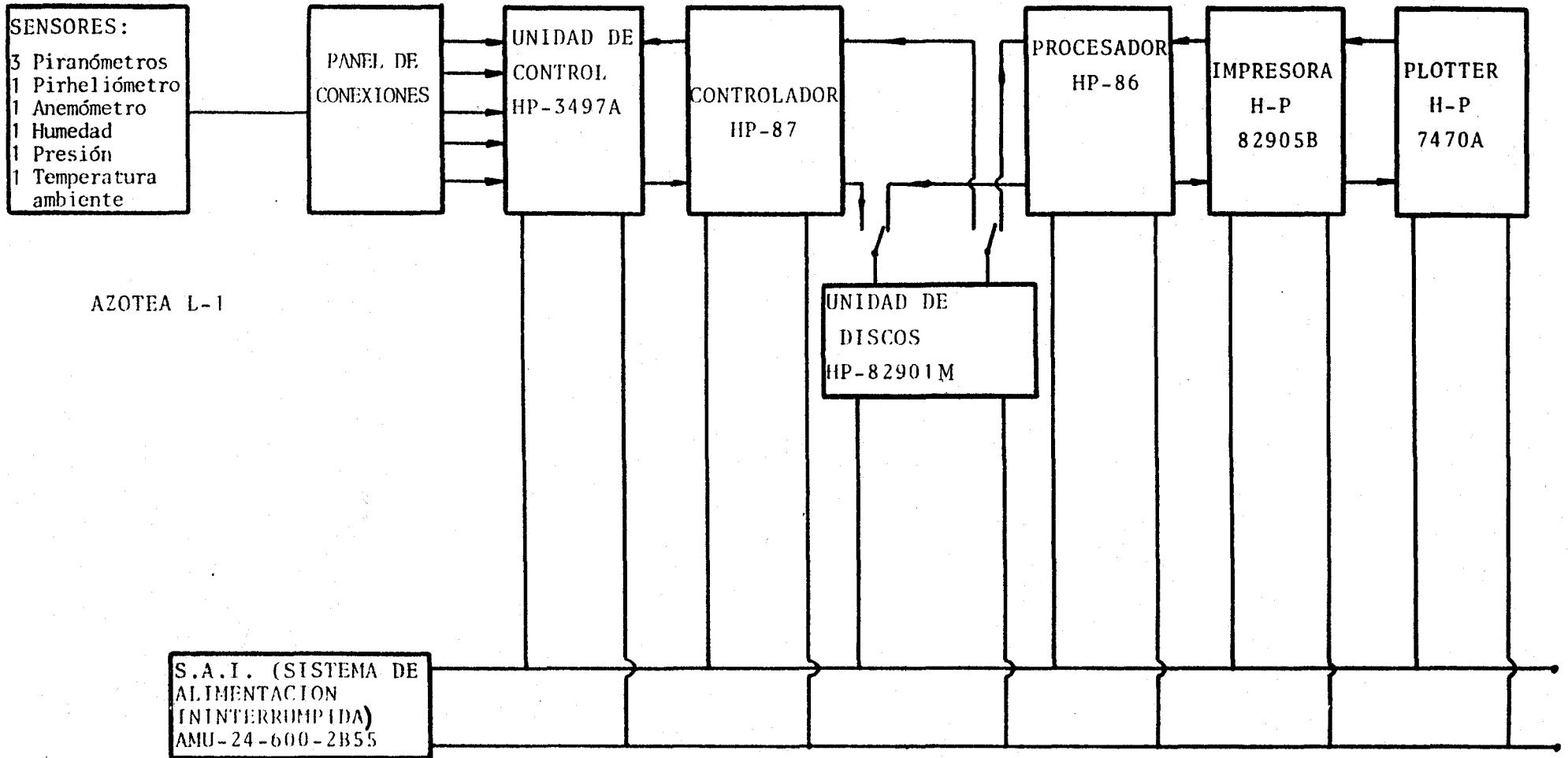
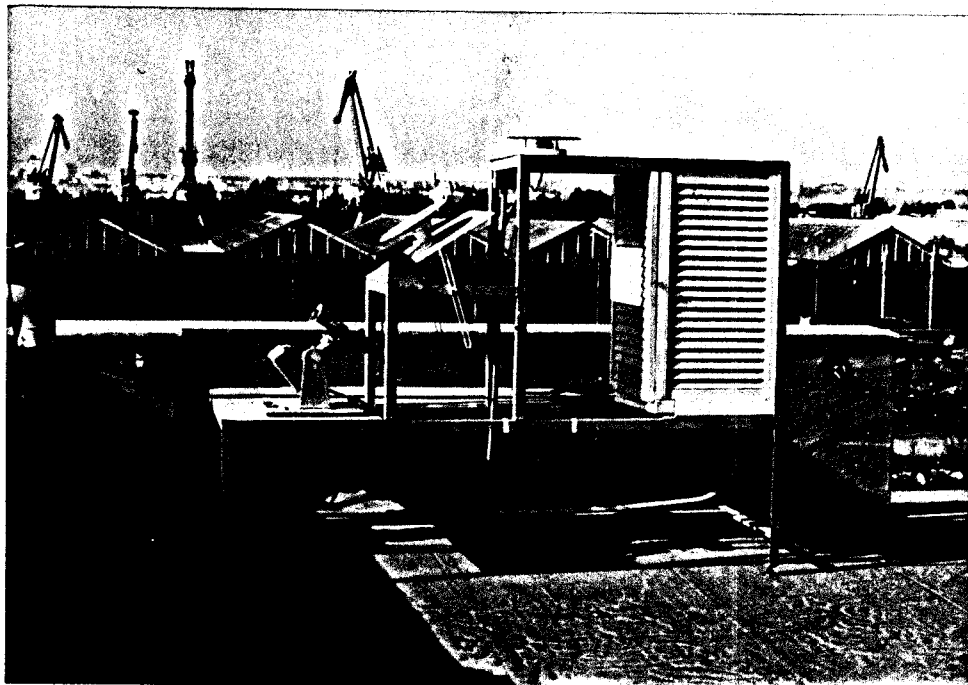
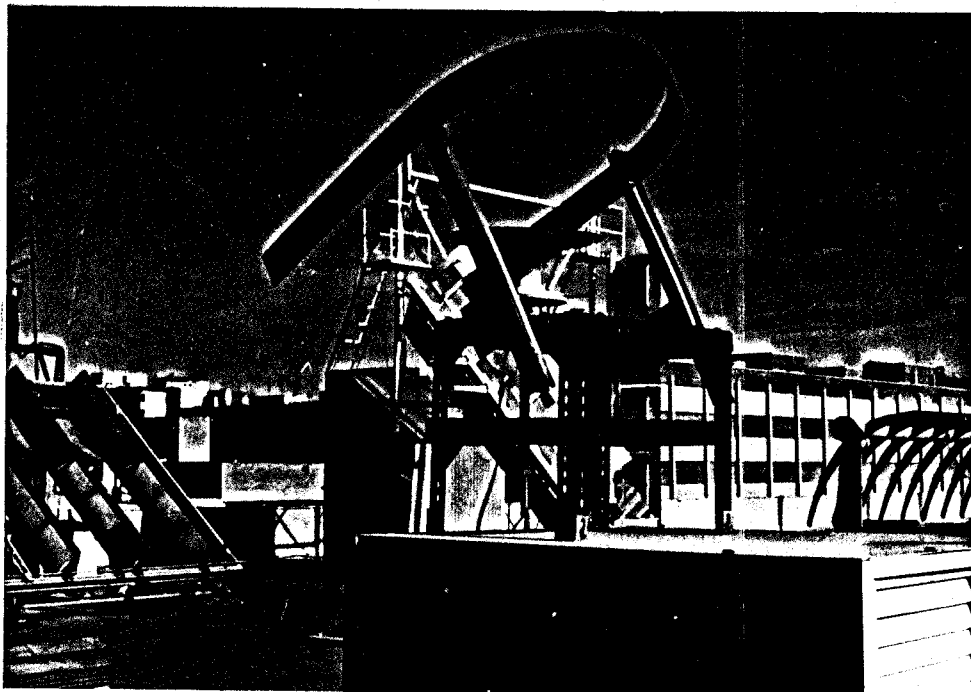


FIG.III.1. ESQUEMA ESTACIÓN DE MEDIDA



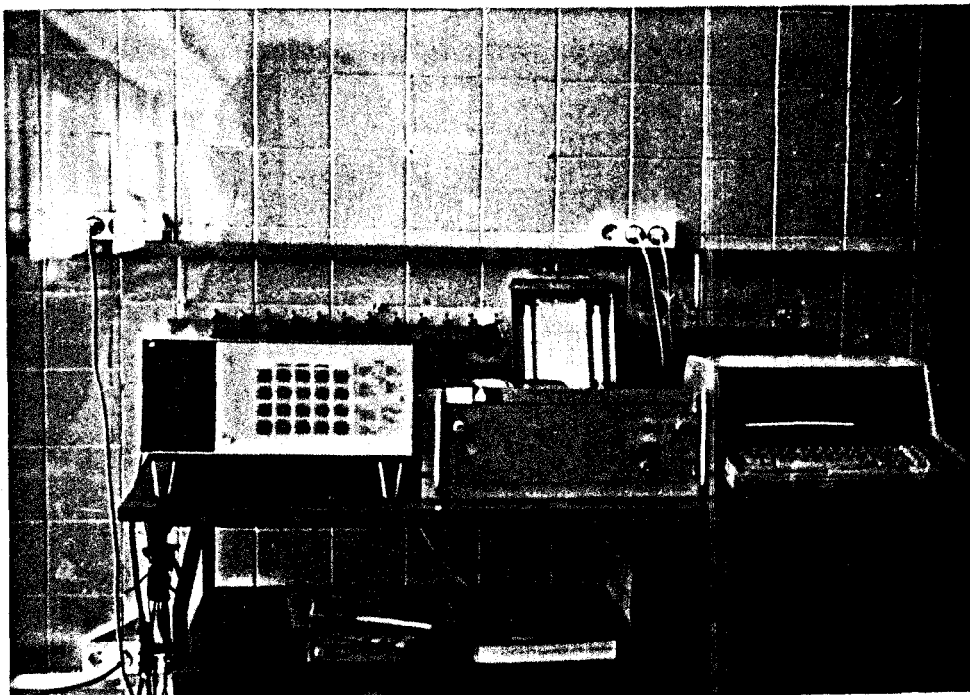
FOTOGRAFIA 1



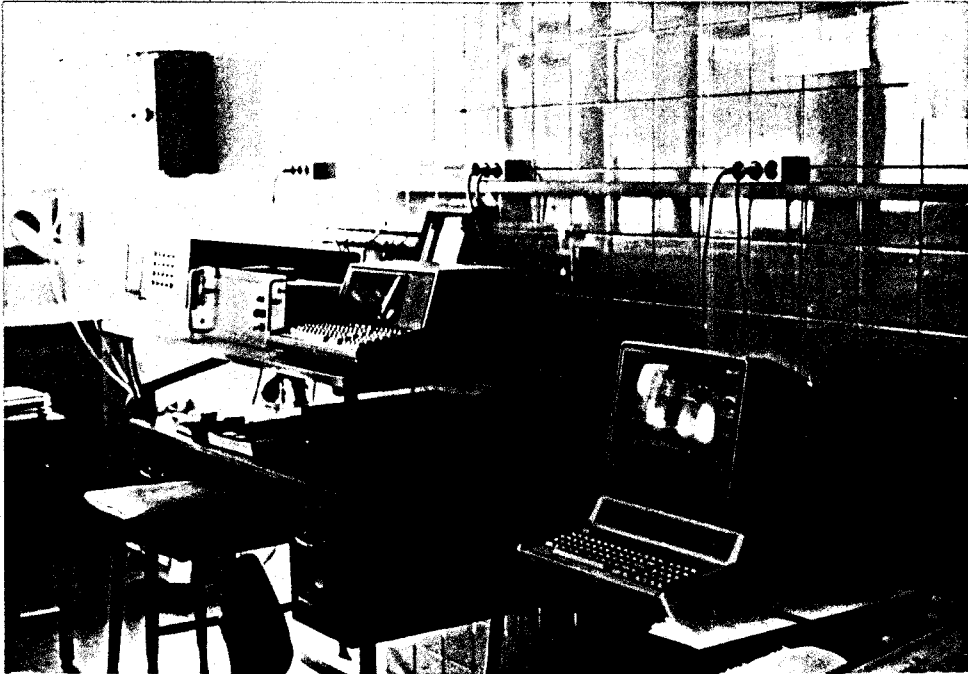
FOTOGRAFIA 2



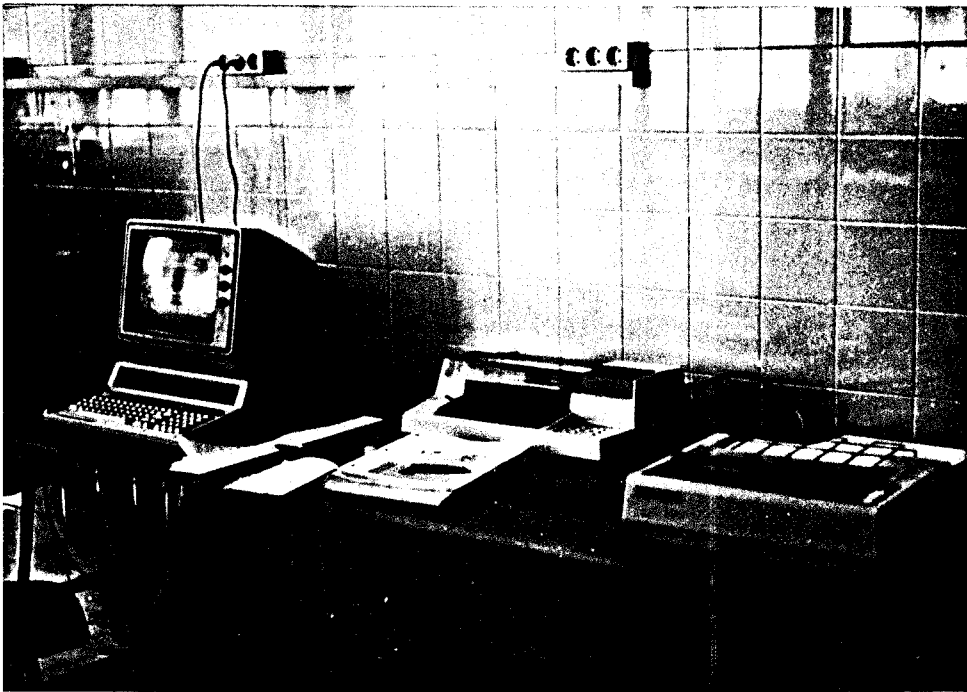
FOTOGRAFIA 3



FOTOGRAFIA 4



FOTOGRAFIA 5



FOTOGRAFIA 6

III.4.- Filosofía de almacenamiento utilizada y medidas realizadas.

La filosofía de almacenamiento de las medidas realizadas, es la siguiente:

Se crea en la memoria del HP-87 dos ficheros de acceso aleatorio. En uno se almacenan los datos de radiación y en el otro las variables meteorológicas. La amplitud del fichero de radiación es variable con la época del año, es decir, depende del día Juliano, en tanto que la del fichero de variables meteorológicas es fija.

Al mismo tiempo, estos ficheros de acceso aleatorio son creados en el disco.

Se miden todas las variables de forma casi instantánea y cada cinco minutos se almacenan en los correspondientes ficheros, localizados en la memoria HP-87, los valores instantáneos y acumulados de radiación así como los valores instantáneos de las variables meteorológicas.

Al ponerse el sol se cierra el fichero de radiación y al acabarse el día se cierra el fichero de variables meteorológicas. En ese momento, ambos ficheros localizados en la memoria del HP-87 son volcados y almacenados en el disco.

A continuación, el programa calcula cuál va a ser la amplitud del fichero de radiación del día Juliano siguiente y lo crea en la memoria central del controlador HP-87, así como el fichero de variables meteorológicas que es fijo en su amplitud. Al mismo tiempo y como ya se dijo, también se prevé esta misma memoria en el disco.

Todo lo dicho puede observarse en el diagrama de bloques del programa que controla todo el sistema.

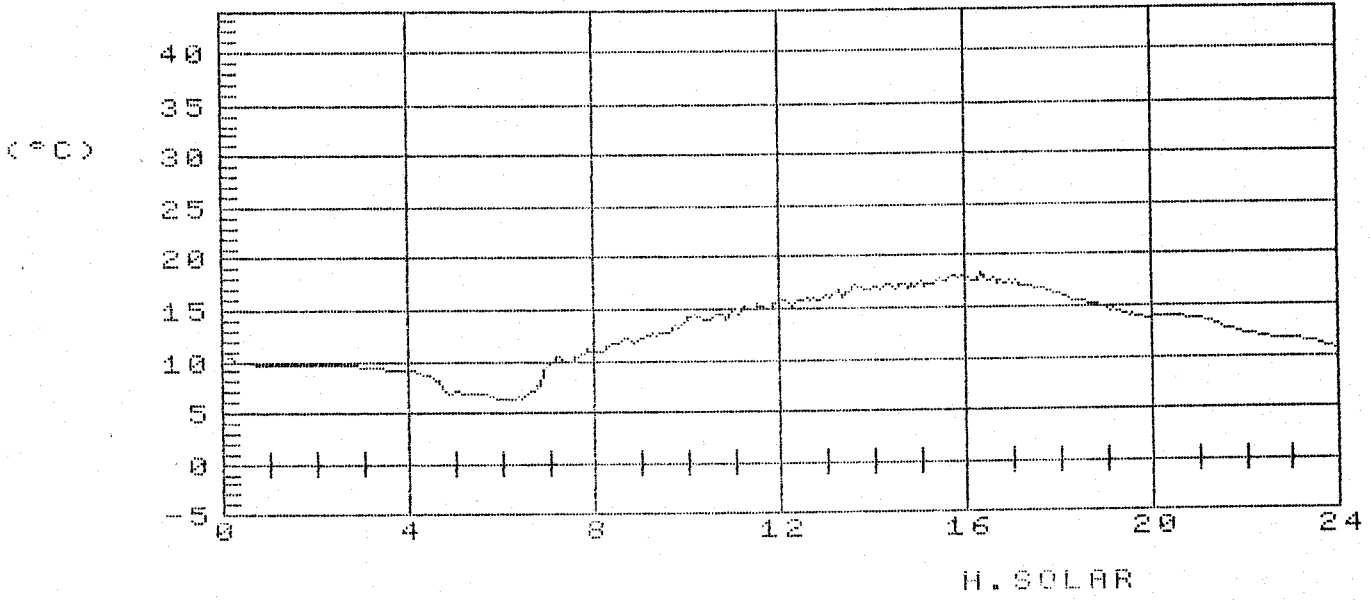
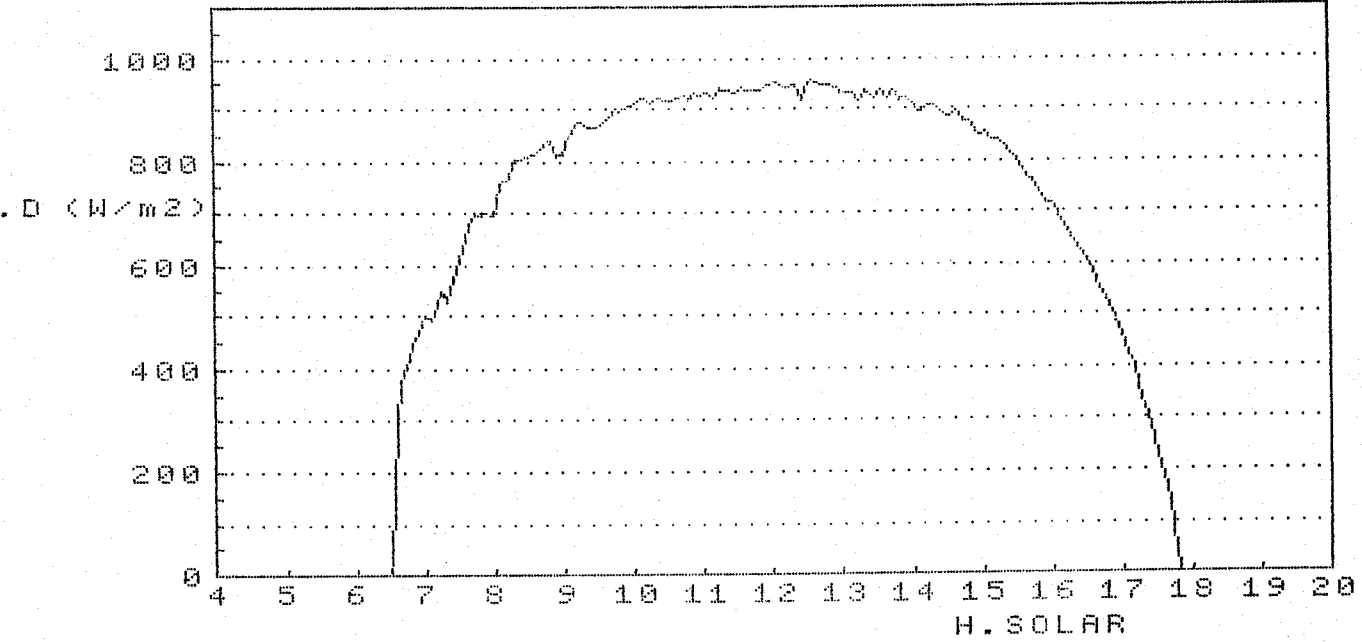
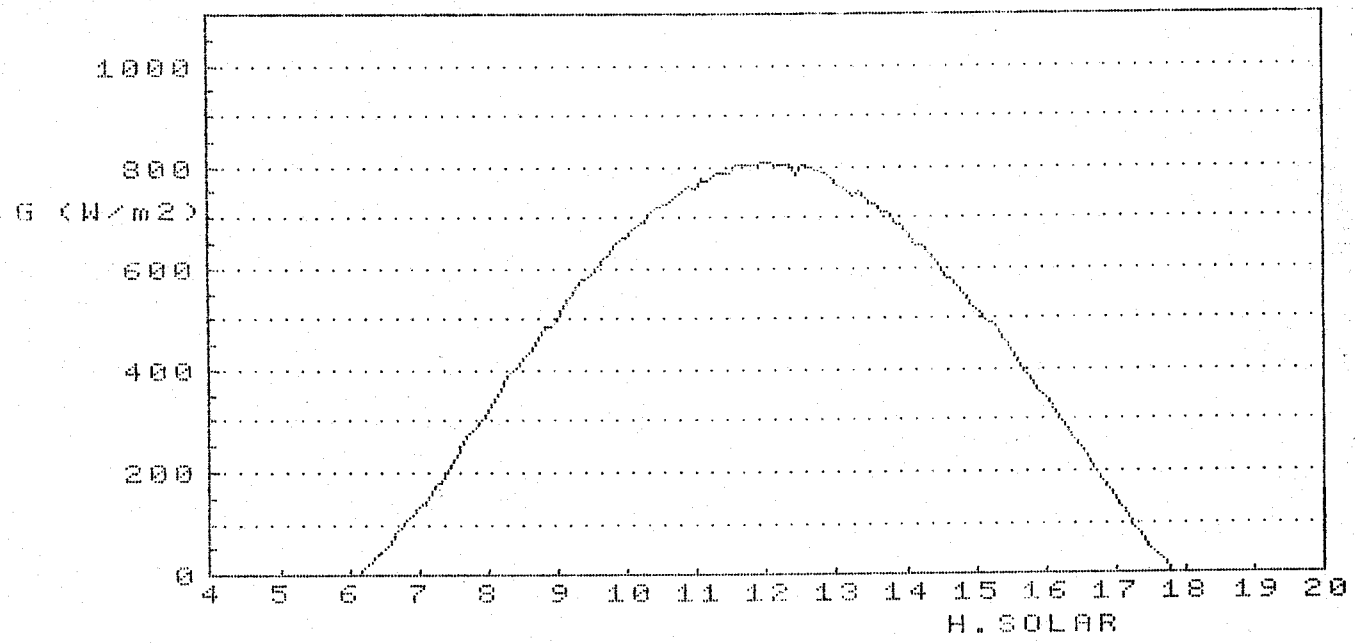
La salida por impresora se obtiene mediante la lectura de los ficheros a través de la HP-86 cuando interesa, con un programa elaborado por nosotros.

Se acompaña una salida impresa cada media hora, pero lo podemos obtener cada cinco minutos. En las hojas anexas se observan las medidas realizadas el día 14 de marzo de 1986, así como las gráficas impresas de irradiancia global horizontal, irradiancia directa normal y temperatura ambiente. En cuanto a las medidas realizadas se puede decir que tienen un punto de arranque en el año 1983, aunque para este período no de manera continuada, y a partir de 1º de enero de 1984 se dispone de una serie ininterrumpida, salvo pequeñas lagunas producidas por averías y necesidades de ajuste del sistema.

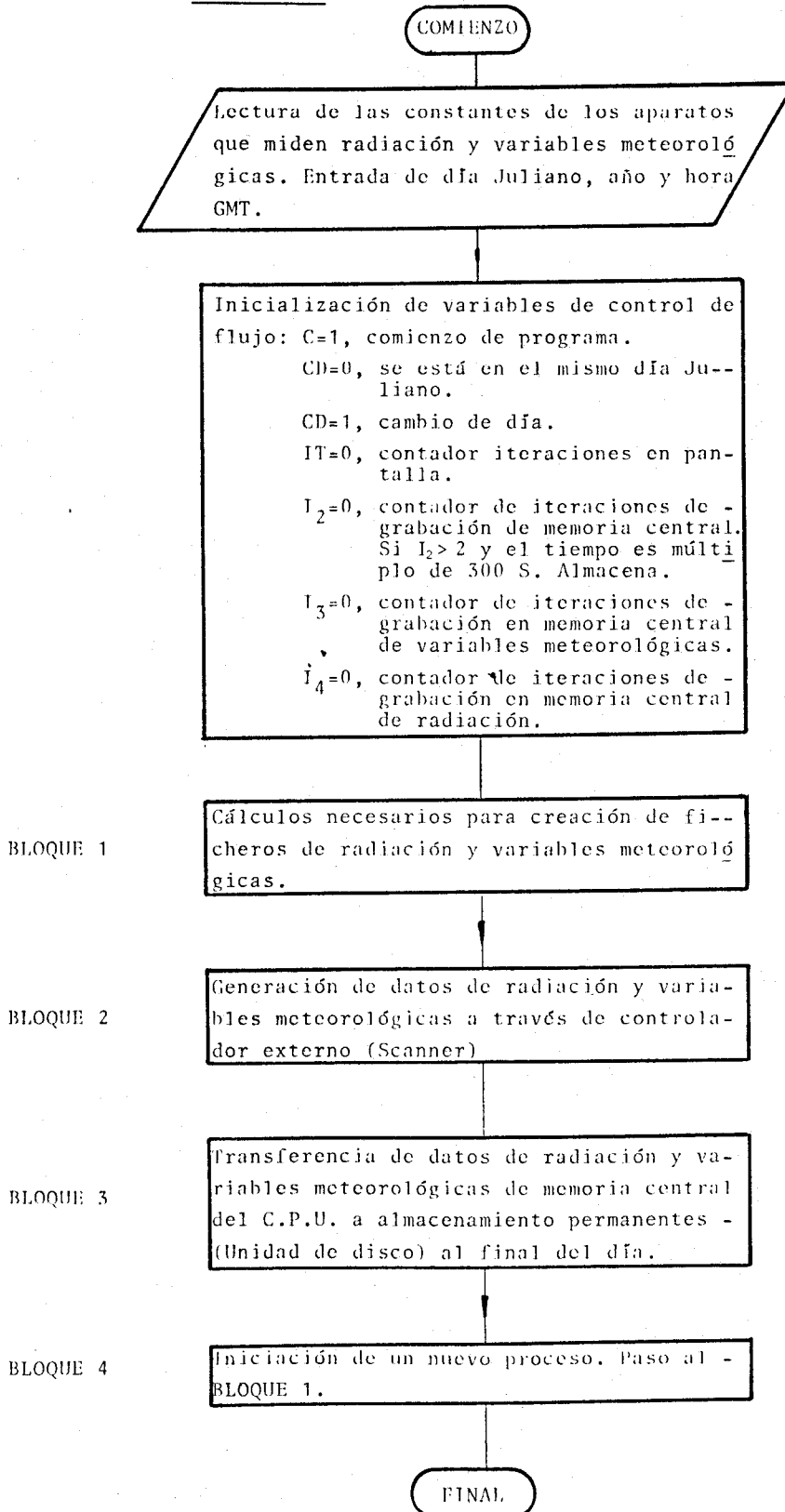
Se dispone de listados de estas series debidamente encarpados y sujetos a disposición de cualquier consulta.

das correspondientes al día: 14 -MARZO- 1986

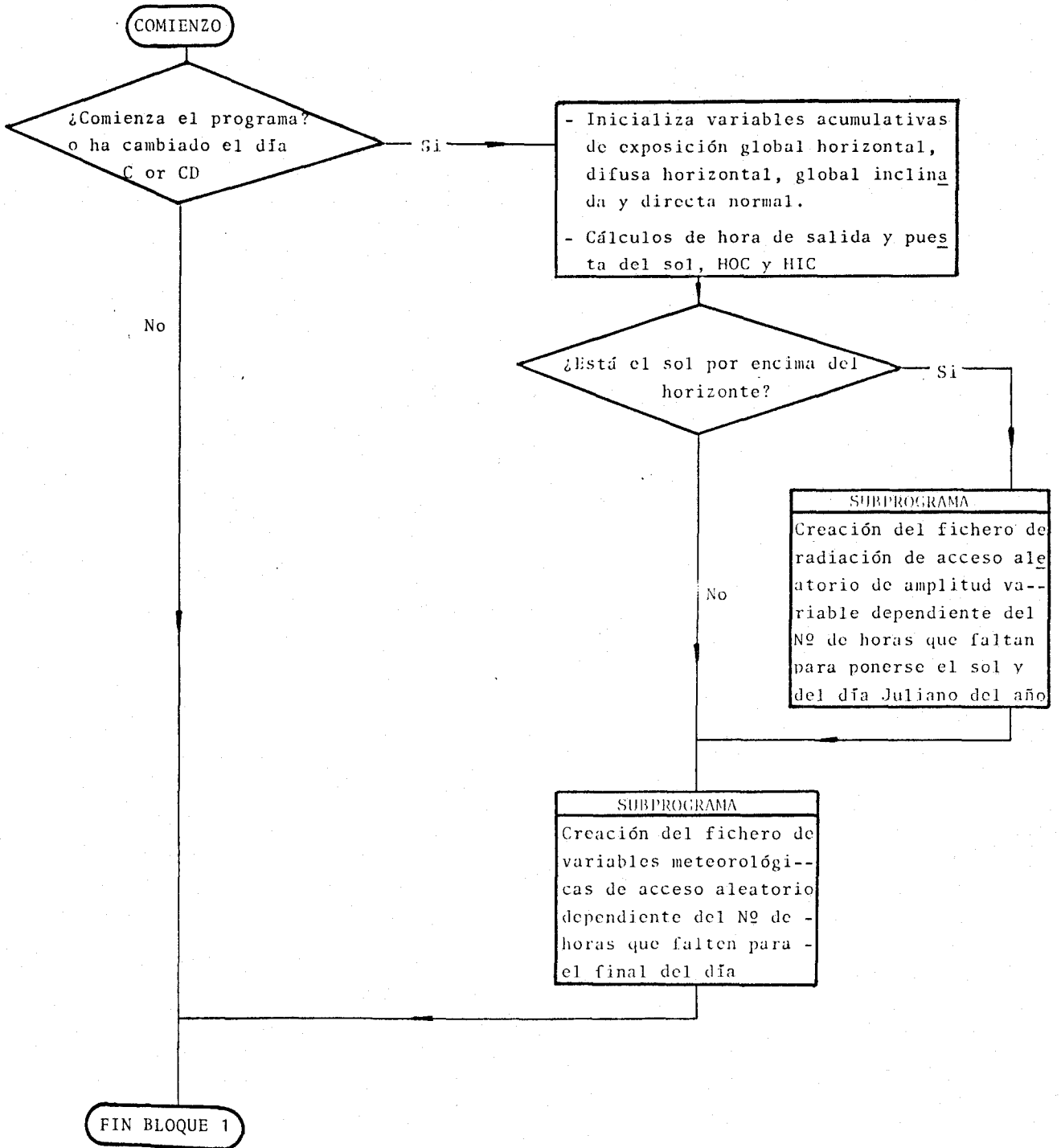
G.M.T	I.G	H.G	I.d	H.d	I30	H30	I.D	H.D	T	V	DV	P	H.R	HORA SOLAR
MM	W/m2	kJ/m2	W/m2	kJ/m2	W/m2	kJ/m2	W/m2	kJ/m2	C	m/s	grado	mbar	%	HH:MM
02									9.9	1.9	26	1014	70	00:30
32									9.7	2.2	17	1014	70	01:00
02									9.5	1.6	302	1014	70	01:30
32									9.7	2.5	2	1013	70	02:00
02									9.6	3.1	356	1012	69	02:30
32									9.4	3.8	344	1011	70	03:00
02									9.2	2.1	43	1012	70	03:30
32									9.0	2.3	2	1011	71	04:00
02									8.3	2.2	284	1013	72	04:30
32									7.1	0.9	174	1012	78	05:00
02									6.7	0.4	96	1012	77	05:30
32									6.4	1.0	136	1011	80	06:00
02	51	6	49	6	58	5	21	0	6.5	0.9	146	1012	79	06:30
32	133	172	48	83	179	223	500	698	9.6	0.6	81	1014	75	07:00
02	224	481	59	178	302	639	614	1661	10.0	1.2	23	1016	70	07:30
32	316	974	64	286	425	1304	698	2878	11.0	2.0	0	1016	67	08:00
02	424	1649	60	393	567	2210	811	4274	11.6	2.0	36	1017	66	08:30
32	497	2479	70	505	663	3322	812	5746	12.3	1.7	56	1017	65	09:00
02	589	3475	75	629	780	4641	863	7298	12.8	3.2	31	1019	63	09:30
32	661	4609	70	763	876	6143	906	8898	14.2	1.2	53	1020	61	10:00
02	721	5861	80	895	952	7800	917	10554	14.1	2.6	48	1020	59	10:30
32	759	7197	80	1045	992	9554	928	12210	14.9	1.3	277	1020	59	11:00
02	789	8603	90	1201	1024	11383	929	13890	15.5	2.0	22	1021	56	11:30
32	811	10046	93	1364	1050	13250	947	15581	15.4	4.1	65	1021	55	12:00
02	799	11490	90	1525	1039	15123	942	17276	15.7	2.6	22	1021	54	12:30
32	766	12911	82	1680	997	16973	933	18979	16.2	1.1	8	1021	52	13:00
02	728	14263	83	1832	956	18737	922	20653	16.5	2.7	77	1020	50	13:30
32	670	15535	76	1974	880	20408	909	22320	17.1	2.3	67	1021	51	14:00
02	597	16682	69	2108	789	21914	887	23939	16.9	1.1	322	1020	50	14:30
32	516	17687	68	2227	684	23250	849	25516	17.6	1.8	17	1020	48	15:00
02	440	18558	78	2364	575	24392	805	27015	17.6	3.8	16	1020	49	15:30
32	344	19256	85	2508	446	25301	714	28373	17.8	3.4	58	1020	49	16:00
02	247	19787	83	2661	313	25984	603	29560	17.5	1.8	25	1020	50	16:30
32	144	20140	65	2797	179	26429	459	30528	17.4	0.9	31	1020	52	17:00
02	49	20311	33	2888	55	26631	226	31166	16.9	1.7	52	1020	53	17:30
32	0	20340	0	2911	0	26664	0	31324	16.2	1.0	111	1020	55	18:00
02									15.5	1.3	119	1020	56	18:30
32									15.0	0.7	240	1020	60	19:00
02									14.1	0.6	303	1020	62	19:30
32									13.9	1.8	73	1019	61	20:00
02									13.9	0.4	37	1019	60	20:30
32									13.7	0.4	340	1019	60	21:00
02									13.0	1.3	342	1017	67	21:30
32									12.3	1.9	350	1016	71	22:00
02									11.8	1.3	8	1014	71	22:30
32									11.6	1.3	16	1014	71	23:00
02									11.3	1.6	7	1015	72	23:30
32									10.6	1.4	32	1014	73	24:00

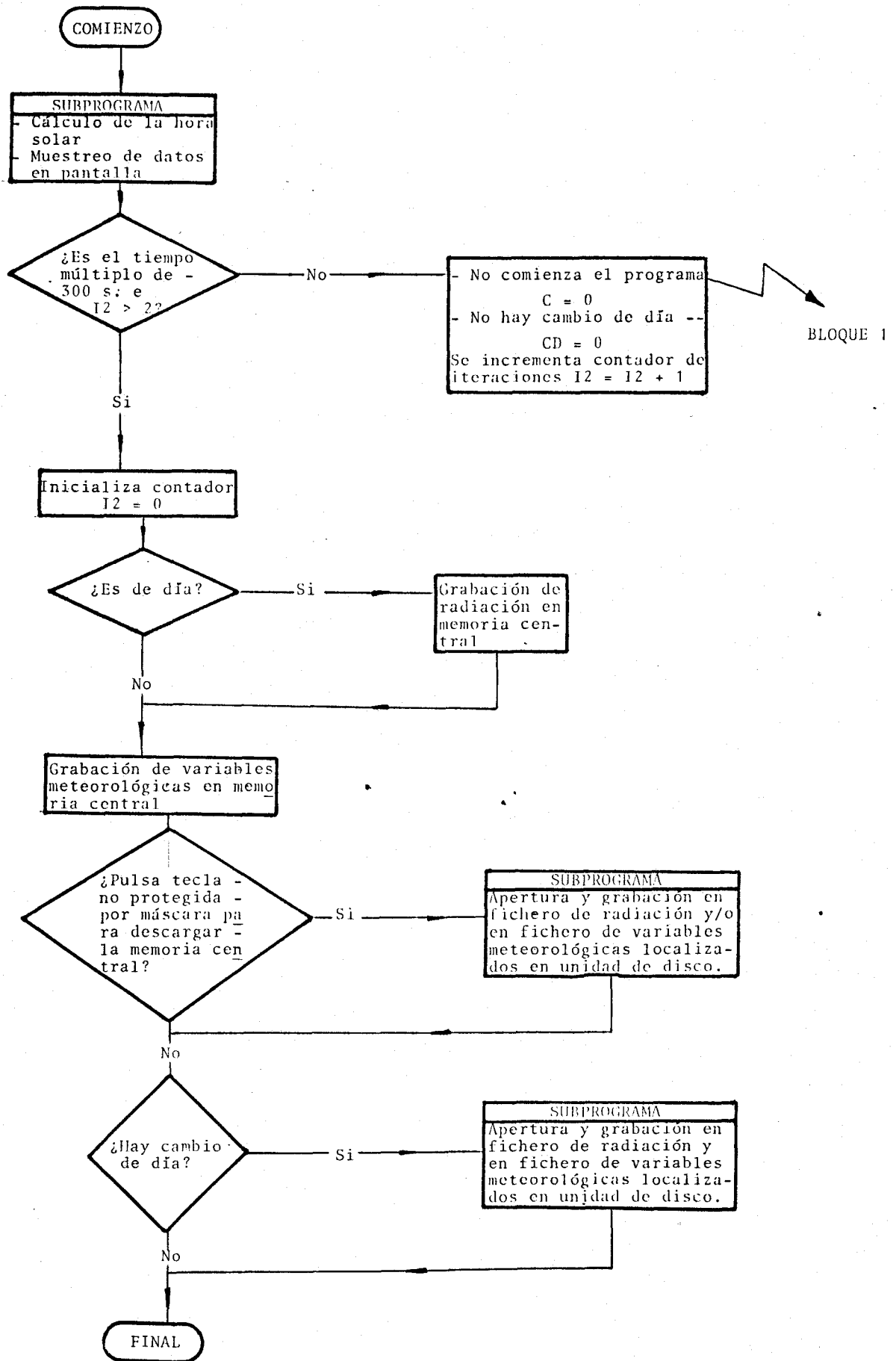


III.4.1. Diagrama de bloques del programa que controla al sistema de medida.



BLOQUE 1





III.5.- Operatividad y mantenimiento del sistema de medida.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de medida está funcionando desde el año 1983. Desde entonces se ha hecho necesario el control del mismo para adquirir datos fiables de radiación solar y otros parámetros meteorológicos relacionados con ella (36,37 y 38) .

Todo ello requiere operaciones continuas de recalibración de los instrumentos, control de errores de las mediciones y corrección de los mismos por diferentes efectos, como pueden ser errores de azimut, en elevación, temperatura, etc.

Por otra parte, en base a la experiencia adquirida en estos años, las operaciones a desarrollar para tener una estación de medida y disponer de ella en condiciones adecuadas, son:

1. Operaciones de montaje.
2. Operaciones de mantenimiento.

III.5.1.- Operaciones de montaje.

El montaje de la estación lleva consigo el disponer de los siguientes elementos:

- a) Sensores .- Los sensores mínimos han de ser : piranómetro horizontal, pirheliómetro con seguimiento, sensor de temperatura, humedad, presión y velocidad y dirección del viento.

Como los sensores están relativamente alejados del lugar donde se controlan los datos y se almacenan, es preciso que las líneas de conexión sean adecuadas para evitar ruidos de fondo que deterioren la medida. Estimamos que por encima de 15 metros son necesarios amplificadores de señal.

En nuestra estación, los sensores están a una distancia - inferior a los 10 metros, por lo que no necesitamos amplificadores de señal.

b) Alimentación del sistema.- Las posibles interrupciones en el suministro de energía eléctrica conllevan la interrupción del programa de adquisición de datos.

Por este motivo, estimamos necesario disponer de un sistema de alimentación ininterrumpida con la autonomía suficiente. Esto es fundamental, si se quiere disponer de series largas de medidas de forma ininterrumpida, pues lo más normal es que se produzcan - fallos en el suministro de energía con relativa frecuencia, aunque de poca duración.

c) Alimentación de sensores.- Algunos sensores necesitan alimentación de tensión estabilizada, entre ellos cabe destacar el sensor analógico de presión y el de humedad relativa. Una variación en la alimentación fuera de los márgenes dados por el fabricante causan errores en las medidas.

Los sensores de temperatura pueden alimentarse indistintamente con tensión o con intensidad, aunque ello no evite que en ambos casos estén estabilizados con la precisión necesaria.

d) Calibración iniciales.- Todos los sensores deben ser calibrados antes de su instalación ya que las características que suministra el fabricante no son suficientemente fiables.

e) Sistema de adquisición de datos.- Estimamos que las medidas deben ser continuas. Por ello, es necesario disponer de equipos automatizados que realicen estas operaciones. En este caso, los equipos mínimos necesarios serían : Controlador, Scanner + microvoltímetro, almacenamiento magnético y salida

impresora.

III.5.2.- Operaciones de mantenimiento.

Aparte de las calibraciones iniciales de montaje y precalibraciones periódicas, que tienen por objeto corregir las variaciones de las respuestas en el tiempo, se puede decir que el mantenimiento del sistema en lo que corresponde a su funcionamiento autónomo, consta de:

- 1) Vigilancia diaria del sistema a fin de que realice las funciones encomendadas.
- 2) Alineación diaria de pirheliómetros, a ser posible a la misma hora del día y por la mañana temprano.
- 3) Limpieza de piranómetro y pirheliómetro con relativa frecuencia, siempre a la misma hora del día.

CAPITULO IV.
CORRELACIONES ENTRE LA IRRADIACION DIFUSA Y
GLOBAL PARA VARIAS LOCALIDADES ESPAÑOLAS.
ESTUDIO DE DISTRIBUCIONES DE K_d

CAPITULO IV
RELACIONES ENTRE LA IRRADIACION DIFUSA Y GLOBAL
PARA MADRID, SEVILLA Y VALENCIA. ESTUDIO DE
DISTRIBUCIONES DE K_d .

IV.1.- Introducción

En este capítulo se dan las relaciones K_d , (cociente entre la irradiación difusa y global horizontales) y el índice de claridad, K_t (cociente entre la irradiación global horizontal y extraterrestre horizontal) usando datos medidos de tres ciudades españolas (Madrid, Sevilla y Valencia). Estas ciudades representan tres zonas bien diferenciadas, tanto por su situación geográfica como por las condiciones climáticas.

Para las tres se aportan las relaciones K_d , K_t diarias y sólo para Madrid y Sevilla se aportan las relaciones \bar{K}_d , \bar{K}_t diarias promedio decenal y mensual, al tener éstas un número suficiente de datos medidos de irradiación global horizontal y difusa horizontal.

Se encuentra que, por ahora, no es conveniente dar una relación única para las tres ciudades debido a las diferencias que se presentan. También se muestra que no es conveniente aplicar relaciones K_d , K_t obtenidas para otros países, porque ello puede ser una fuente importante de error para cálculos posteriores.

A consecuencia de la heterocedasticidad decreciente con K_t , observada en todas las representaciones de pares K_d , K_t , se ha hecho un estudio de distribuciones de frecuencias relativas y acumuladas.

Se han estudiado las relaciones entre valores horarios de radiación difusa y global horizontal, aportando una relación K_{do} ,

Kt para valores horarios en Sevilla.

Por último, se han modelizado las gráficas horarias en función de la altura de Iqbal mediante expresiones analíticas, por medio de un ajuste de Fourier y se han comparado con la relación Kdo, Kt obtenida para Sevilla, llegándose a la conclusión de que para la estimación de valores horarios de difusa no es fundamental tener en cuenta la altura del sol, aunque si lo sea para otros estudios.

IV.2.- Base de Datos.

Las características de las estaciones consideradas en este capítulo se dan en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1

LOCALIDAD	LATITUD		LONGITUD		ALT. (m.)	SENSORES EMPLEADOS
	(grado)	(min.)	(grado)	(min.)		
C. Univ. (Madrid)	40	27N	3	43N	664	Kipp-Zonen (global horizontal). Kipp-Zonen (con banda de sombra para difusa).
E.S.I.I. (Sevilla)	37	22N	6	00N	10	Kipp-Zonen (global horizontal). Eppley-Nip (directa)
E.S.I.I. (Valencia)	39	29N	0	23N	13	Eppley -- (global horizontal). Eppley-Nip (directo).

De las publicaciones D-40, D-41, D-44 y D-45, del Instituto Nacional de Meteorología se han utilizado los valores horarios de irradiación difusa y global horizontal para un período equivalente a 5 años y 5 meses, correspondiente a 1977-1983.

Para Sevilla se han utilizado las medidas que se vienen haciendo en la azotea de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales desde 1983 y hasta final de mayo de 1986. De todas las medidas disponibles, se han rechazado las correspondientes a numerosos días por alguna de las siguientes causas:

1. Días en los que sólo se dispone de irradiación global horizontal.
2. Días en los que los datos de la componente directa de la radiación no son fiables por diversas razones (mal alineamiento del pirheliómetro, cortes de energía, etc).
3. Días en los que se ha producido interrupción de la medida, aunque ésta fuera por un intervalo pequeño de tiempo. En este sentido, no se ha hecho ningún intento de recuperar por algún procedimiento estadístico los datos correspondientes al intervalo de tiempo perdido.

Para Valencia se han utilizado las medidas correspondientes a 1982 y 1983 y por razones similares a las de Sevilla, sólo se han utilizado 358 días.

En Sevilla y Valencia se han empleado para la obtención de las relaciones K_d , K_t , medidas de irradiación global horizontal y directal normal. La irradiación difusa se ha calculado de forma casi instantánea cada 8 segundos a través de la expresión:

$$H_{dh} = H_{gh} - H_D \cdot \sin \alpha$$

Los valores de H_{dh} , H_{gh} y H_D han sido almacenados en soporte magnético cada cinco minutos para su posterior tratamiento, como ya se ha descrito en el Capítulo III.

IV.3.- Correlaciones diarias.

Los valores individuales de K_d frente a K_t y el ajuste obtenido para las localidades analizadas y el período de tiempo considerado pueden observarse en las Figuras IV.1 a IV.3. Por otra parte, la Figura IV.4 muestra una comparación entre las relaciones obtenidas para Madrid, Sevilla y Valencia.

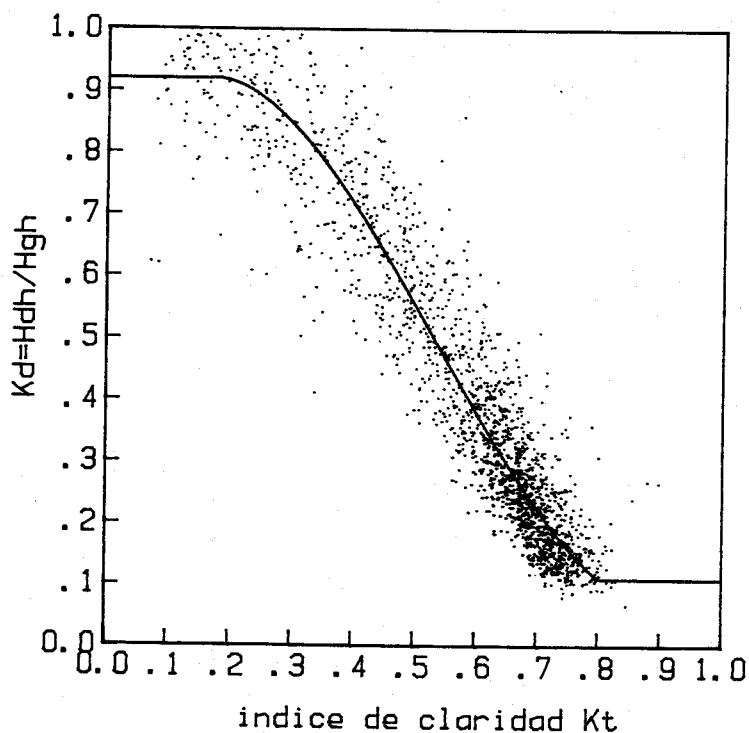


Fig. IV.1. Valores experimentales K_d , K_t para Madrid.

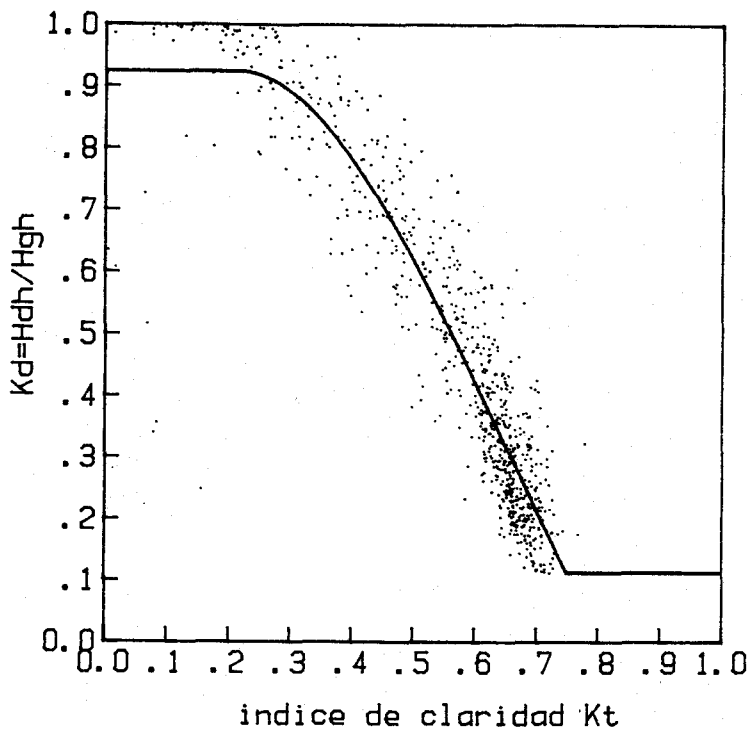


Fig. IV.2. Valores experimentales K_d , K_t para Sevilla.

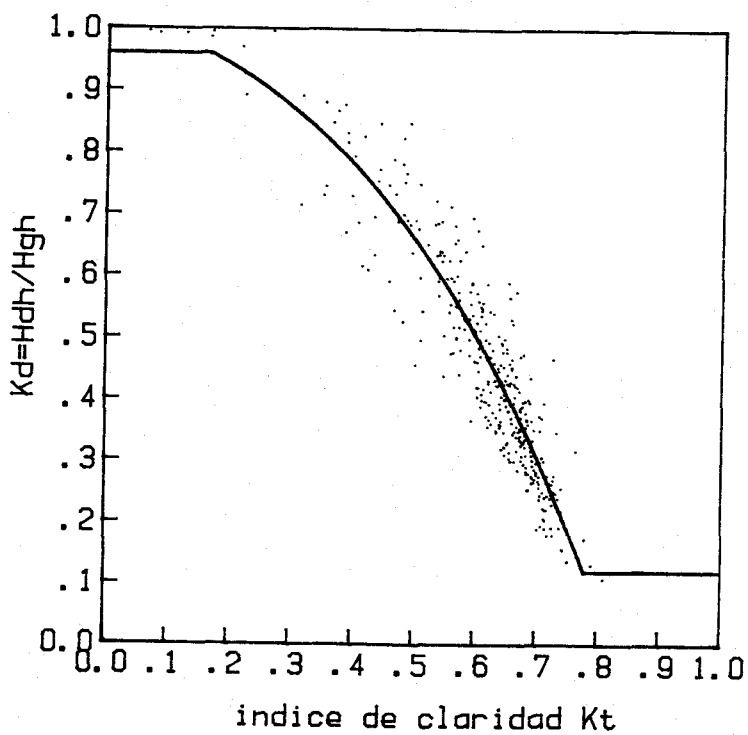


Fig. IV.3. Valores experimentales K_d , K_t para Valencia.

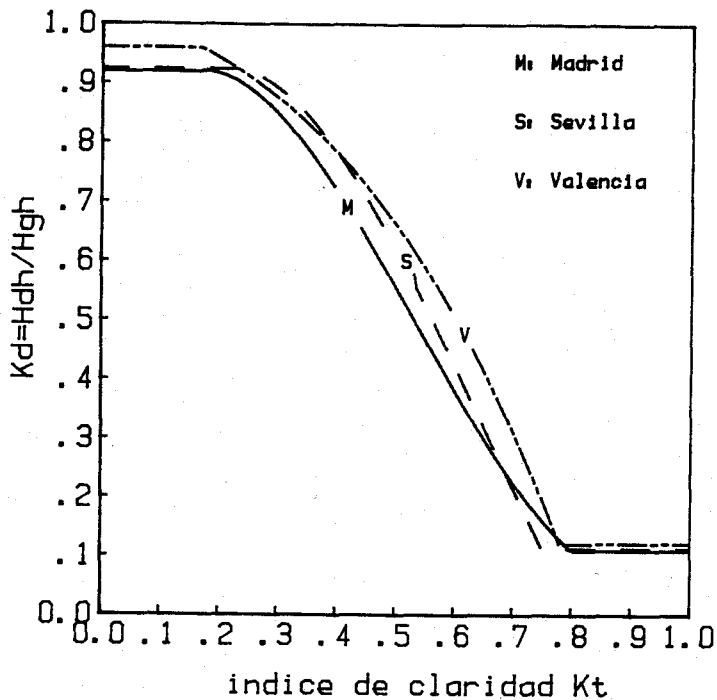


Fig. IV.4. Comparación entre las relaciones K_d , K_t obtenidas para las tres ciudades.

Una ecuación cúbica proporciona para todas las ciudades el mejor ajuste de los datos, confirmando este último la validez de la aproximación de Liu-Jordan (28), Ruth-Chant (30), Munner-Hawas (31), aunque Collares-Rabl (29) aproximan a un polinomio de cuarto orden.

MADRID :

El ajuste de un polinomio de grado tres conduce a la expresión:

$$K_d = 0.92 \quad \text{si} \quad K_t < 0.166$$

$$K_d = 0.77 + 1.93 K_t - 6.86 K_t^2 + 4.27 K_t^3$$

(10.03) (-15.60) (17.84)

$$\text{si} \quad 0.166 \leq K_t \leq 0.8$$

$$K_d = 0.109 \quad \text{si} \quad K_t > 0.8$$

Los valores entre paréntesis son los estadísticos T de Student respectivos, que al compararlos con los cuantiles del 99% de la distribución t (1822), resultan significativamente distintos de cero y el estadístico de análisis de la varianza es $F = 5588.5$, significativo al mismo nivel.

El coeficiente de determinación es $r^2 = 0.903$, o sea, que el 90.3% de la varianza de Kd es explicada por el modelo y la desviación típica residual es $Se = 0.08$.

SEVILLA:

También un ajuste polinómico de grado tres, es el que conduce al mejor resultado:

$$Kd = 0.924 \quad \text{si} \quad Kt < 0.22$$

$$Kd = 0.680 + 2.47 Kt - 6.95 Kt^2 + 3.53 Kt^3$$

$$\text{si} \quad 0.22 \leq Kt \leq 0.75$$

$$Kd = 0.112 \quad \text{si} \quad Kt > 0.75$$

El coeficiente de determinación es $r^2 = 0.864$, o sea, que el 86.4% de la varianza de Kd es explicada por el modelo y la desviación típica residual es $Se = 0.09$.

VALENCIA:

La ecuación obtenida es:

$$Kd = 0.96 \quad \text{si} \quad Kt < 0.17$$

$$Kd = 1.03 - 0.34 Kt - 0.32 Kt^2 - 0.95 Kt^3$$

$$\text{si} \quad 0.17 \leq Kt \leq 0.78$$

$$Kd = 0.12 \quad \text{si} \quad Kt > 0.78$$

El coeficiente de determinación ha sido $r^2 = 0.866$ y la desviación típica residual es $Se = 0.067$.

IV.3.1.- Comparación de distintas correlaciones K_d , K_t diarias.

La Fig. IV.5 muestra una comparación de nuestro resultado de Madrid con los obtenidos por Liu-Jordan (27), Ruth-Chant (29), Collares-Rabl (28) y Munner-Hawas (30).

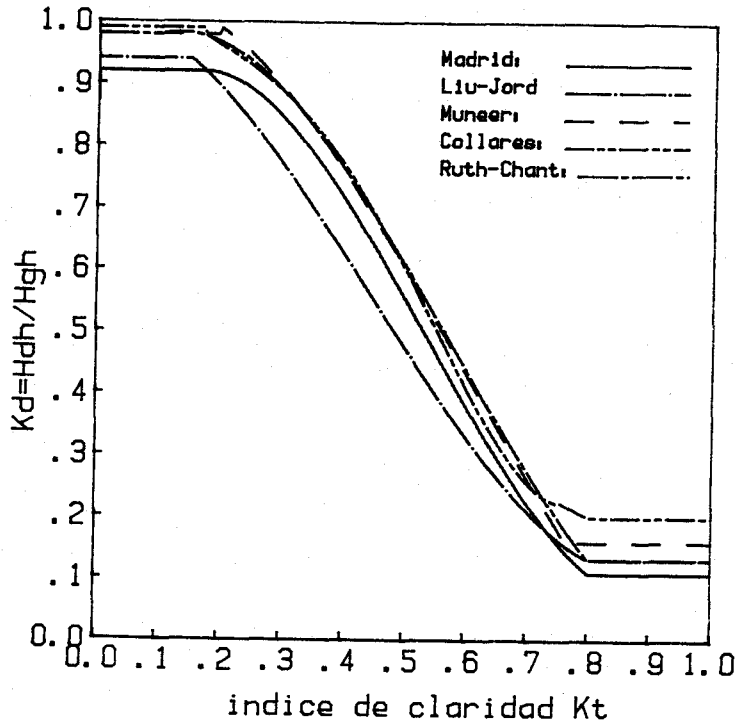


Fig. IV.5. Comparación del resultado de Madrid con los obtenidos por otros autores en otras localidades.

La Fig. IV.6 muestra la comparación del resultado obtenido para Sevilla con los obtenidos por los autores anteriores para otras localidades.

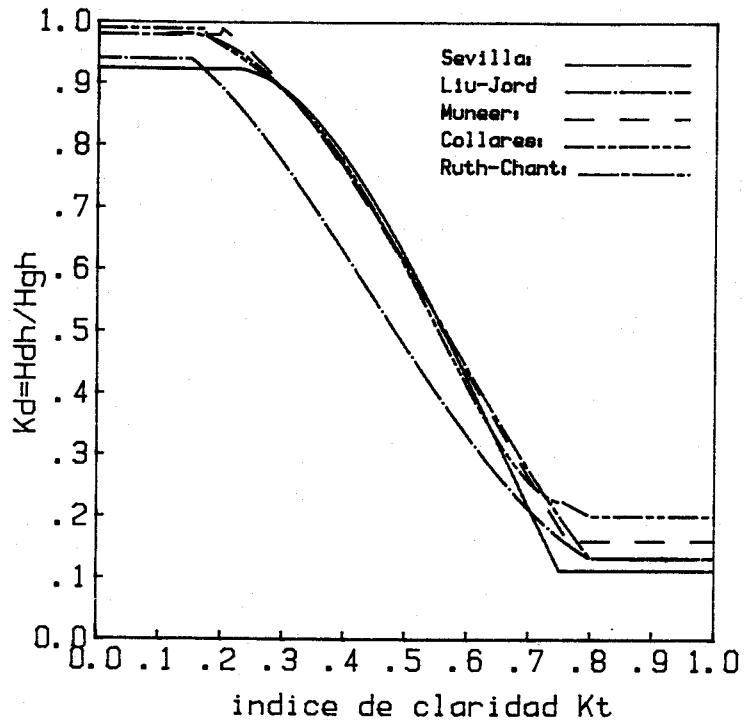


Fig. IV.6. Comparación del resultado de Sevilla con los obtenidos por otros autores en otras localidades.

Del estudio de las comparaciones entre las diferentes correlaciones K_d , K_t se deduce que una correlación única no es aplicable a cada país o región.

En la Fig. IV.5 puede observarse como los valores de K_d que se obtendrían para Madrid con las correlaciones K_d , K_t anteriores o bien estarían por encima de su valor real, caso de aplicar las relaciones de Collares, Ruth-Chant o Muneer, o bien estarían muy por debajo, caso de aplicar la relación diaria de Liu-Jordan.

Sin embargo, en la Fig. IV.6 puede observarse que excepto la correlación de Liu-Jordan que caería muy por debajo comparada con la de Sevilla, las demás relaciones K_d , K_t hubieran dado buenos resultados para valores de K_t comprendidos entre 0.3

y 0.6, aunque para valores superiores a K_t igual a 0.6 el K_d de Sevilla se hace inferior que el proporcionado por los distintos autores.

Vemos que, a veces, los resultados obtenidos con unas correlaciones pueden ser suficientemente próximos a los que se obtendrían con las propias correlaciones, pero ésto es un hecho que no lo sabremos hasta haberlo comprobado.

La Fig. IV.7 muestra una comparación entre los valores de K_d por las correlaciones de Madrid y Sevilla, respectivamente. Se observa en ella como el K_d de Sevilla, en una zona comprendida entre 0.3 y 0.9, cae por encima del K_d de Madrid. Para días muy claros $K_d < 0.25$, el K_d de Sevilla es inferior al de Madrid, pero que, en general, se mantiene el cielo de Madrid al menos en la zona donde se han tomado las medidas, con menos difusa que en Sevilla.

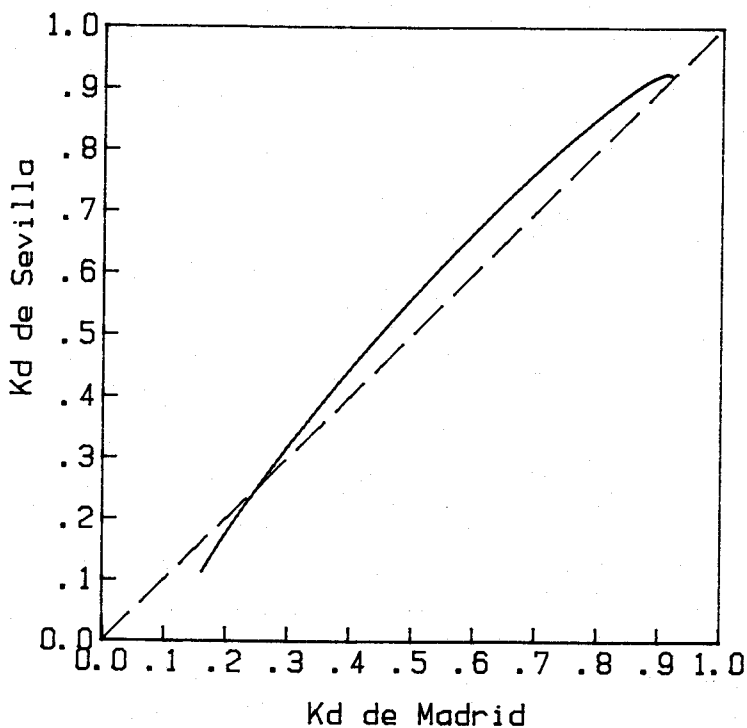


Fig. IV.7. Comparación de los valores de K_d que se obtienen por las correlaciones dadas para Madrid y Sevilla.

La Fig. IV.8 muestra las diferencias entre los valores de K_d de Sevilla y Madrid para un valor dado de K_t . Se observa en ella que para valores de K_t comprendidos entre 0.2 y 0.68 aproximadamente, el K_d de Sevilla es superior al de Madrid, lo que indica que en Madrid hay menos componente difusa para estos valores de K_t . Sin embargo, para $K_t > 0.68$, el K_d de Sevilla se hace más pequeño que el de Madrid. En general, para estas dos localidades, cuando el día es claro, lo es más en Sevilla que en Madrid, pero hay más componente de difusa en Sevilla que en Madrid.

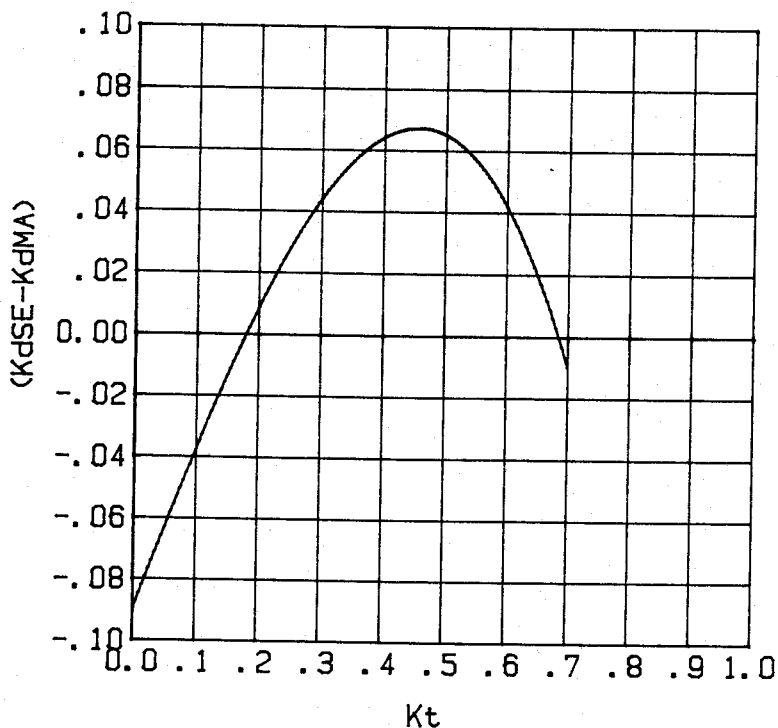


Fig. IV.8. Diferencia entre valores de K_d de Sevilla y Madrid para cada valor dado de K_t .

Las máximas diferencias se obtienen para K_t comprendido entre 0.40 y 0.55 aproximadamente, lo que viene a representar un 12% de difusa superior en el cielo de Sevilla con relación al de Madrid.

La Fig. IV.9 muestra las diferencias entre los valores de K_d de Sevilla y Valencia para cada valor de K_t . Para K_t comprendido entre 0.25 y 0.4, el K_d de Sevilla es ligeramente superior al de Valencia, mientras que para K_t superior a 0.4 el K_d de Valencia es superior al de Sevilla. Esto indicaría que en Valencia se mide más componente difusa que en Sevilla.

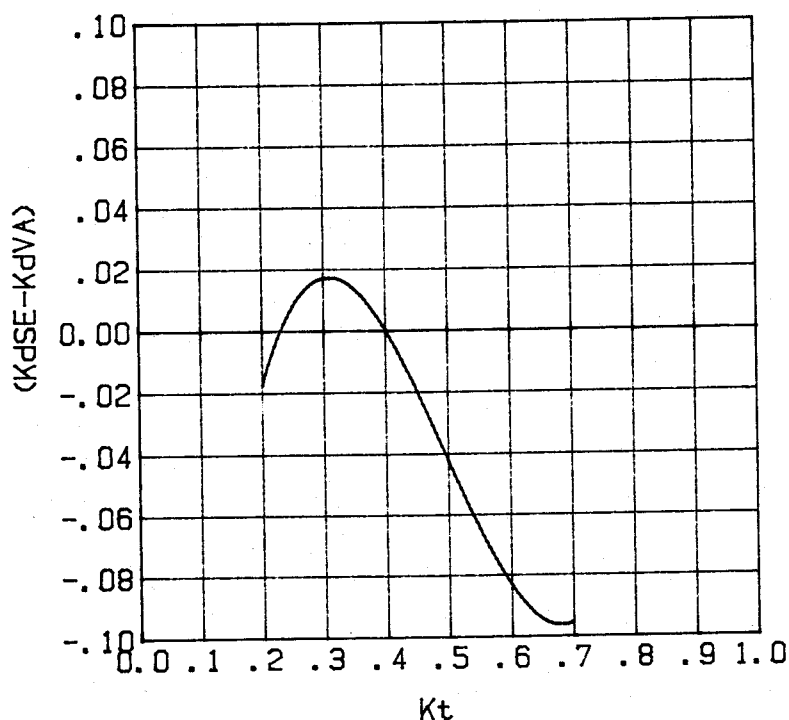


Fig. IV.9. Diferencia entre valores de K_d de Sevilla y Valencia para cada valor de K_t .

De una forma general, a partir del estudio realizado, podemos sacar las siguientes conclusiones parciales:

1. Debido a que las correlaciones K_d - K_t para Madrid están hechas con medidas de difusa y global y que las de Sevilla proceden de difusa calculada a partir de - medidas de directa y global, no se puede afirmar con - seguridad que en el cielo de Madrid exista menos compo

nente difusa que en Sevilla, aunque parezca así de la -
Fig. IV.8.

2. En Sevilla y Valencia, donde se realizaron el mismo tipo de medidas (directa y global) para la obtención de las - correlaciones K_d - K_t , si se puede afirmar con más seguridad, salvo errores sistemáticos propios de las medidas, que en Sevilla hay menos componente difusa que en Valencia.

Esto parece lógico, pues Valencia está en zona costera y la estación de medida en concreto estaba a menos de 1 Km del mar, por lo que el contenido de vapor de agua a lo largo del año es elevado.

IV.3.2.- Estudio de distribuciones de frecuencias K_d - K_t para Madrid, Sevilla y Valencia.

Como consecuencia de la heterocedasticidad decreciente con K_t , observada en la gráfica de Madrid, Fig. IV.1, se ha hecho un estudio de distribuciones de frecuencias y frecuencias acumuladas de días para los que K_t y K_d caen dentro de un cierto intervalo de clase de 0.025.

Las Figs. IV.10 a IV.21 muestran estos resultados. Teniendo en cuenta que el número de días útiles utilizados para Madrid, Sevilla y Valencia han sido 1827, 757 y 358, respectivamente, observamos que en Madrid el máximo valor de K_t está comprendido entre 0.675 y 0.700 con el 11% de los días, para Sevilla el máximo valor de K_t está comprendido entre 0.65 y 0.675 con el 16% de los días y Valencia el máximo -

está comprendido entre 0.65 y 0.675, es decir, igual que Sevilla, con el 14,5% de los días.

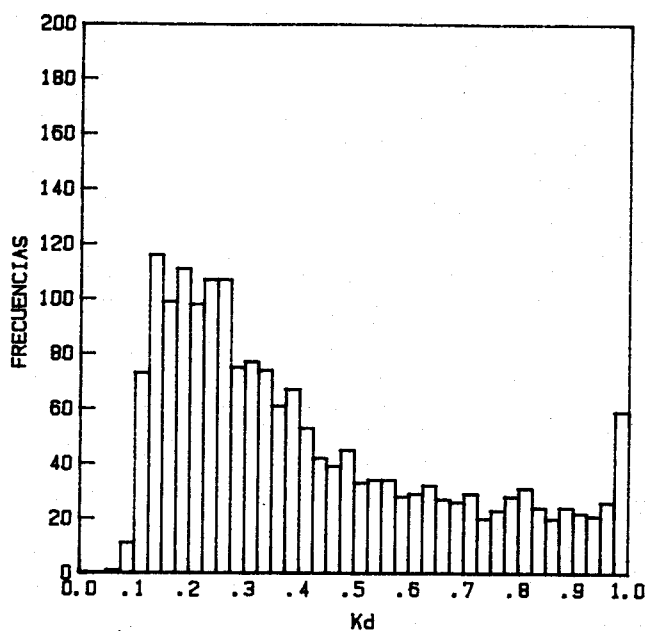
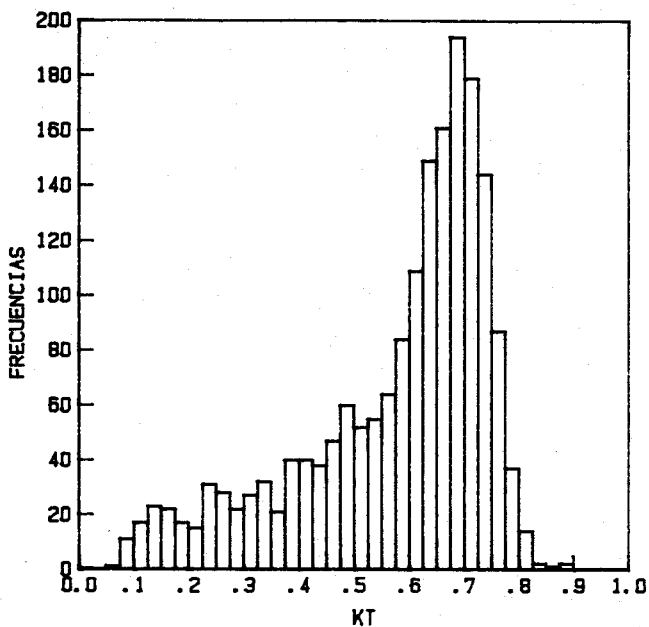


Fig. IV.10. Distribución de frecuencias diarias de Kt para Madrid.

Fig. IV.11. Distribución de frecuencias diarias de Kd para Madrid.

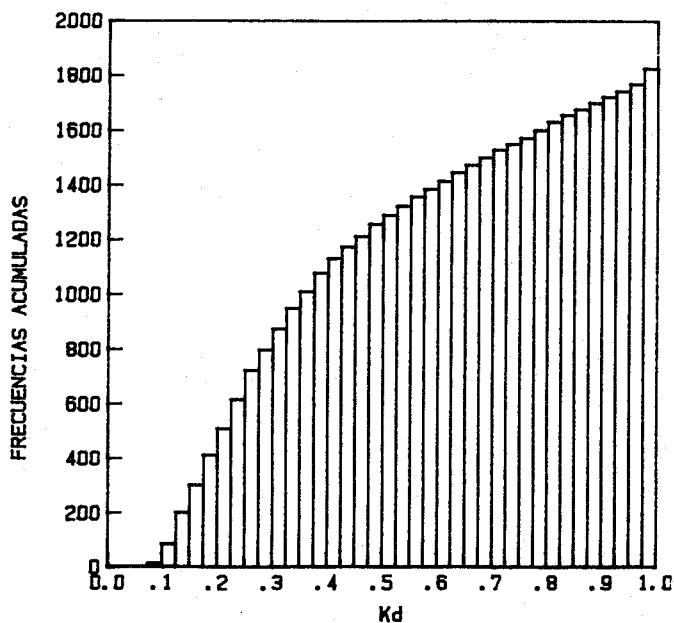
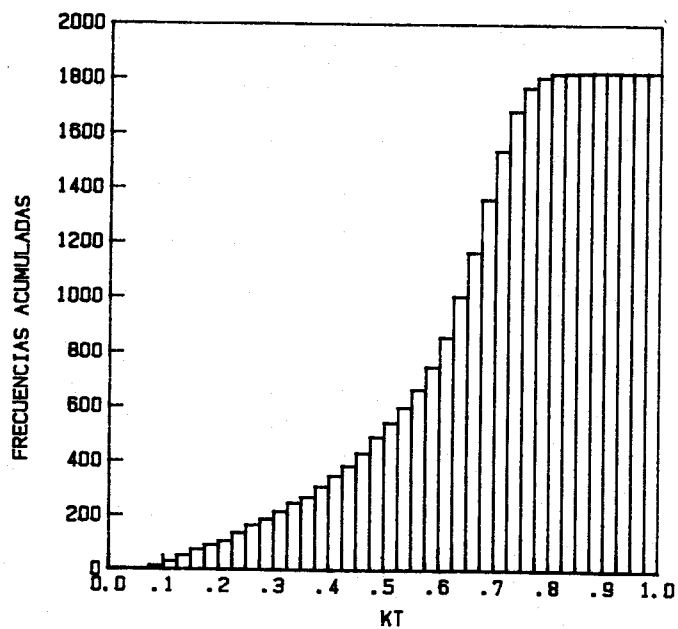


Fig. IV.12. Distribución diaria para Madrid de frecuencias acumuladas de Kt.

Fig. IV.12. Distribución diaria para Madrid de frecuencias acumuladas de Kd.

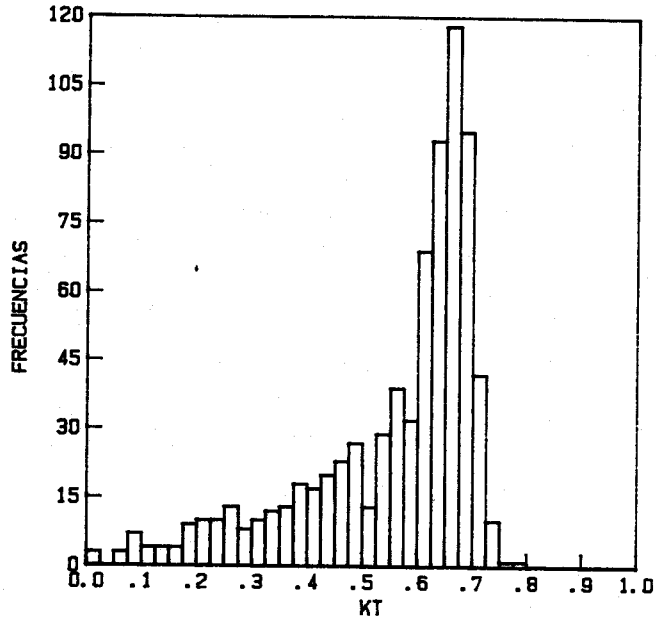


Fig. IV.14. Distribución de frecuencias diarias de Kt para Sevilla.

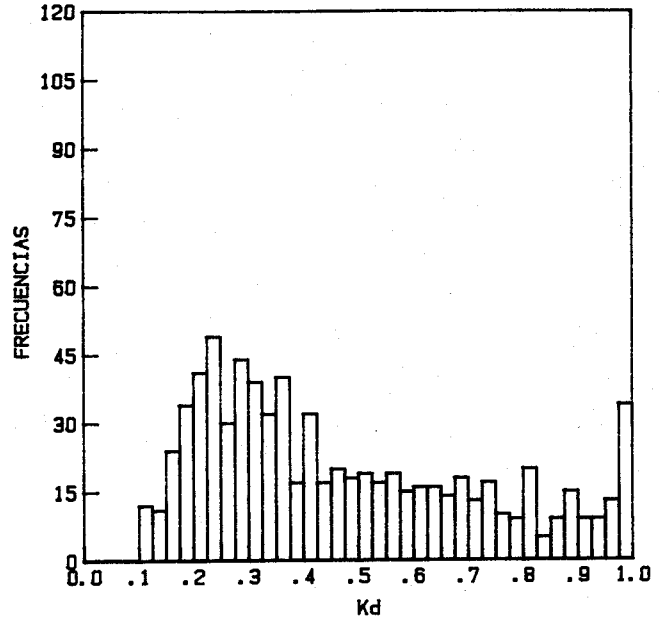


Fig. IV.15. Distribución de frecuencias diarias de Kd para Sevilla.

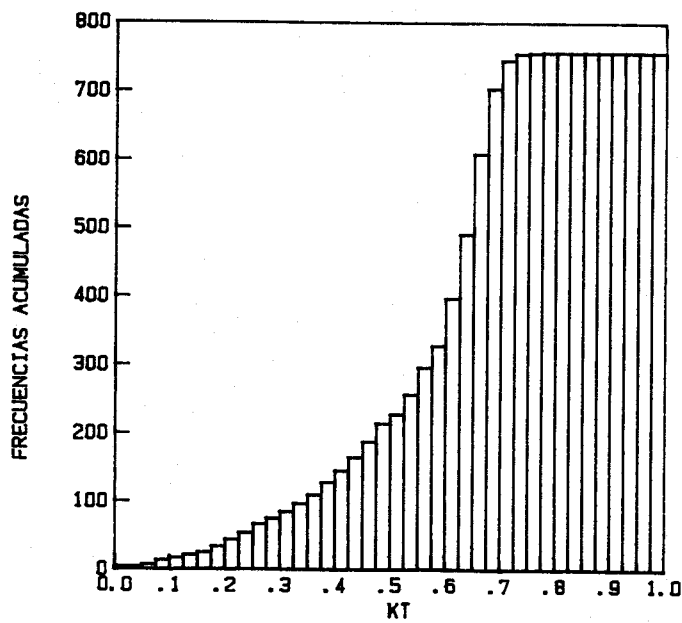


Fig. IV.16. Distribución diaria para Sevilla de frecuencias acumuladas de Kt.

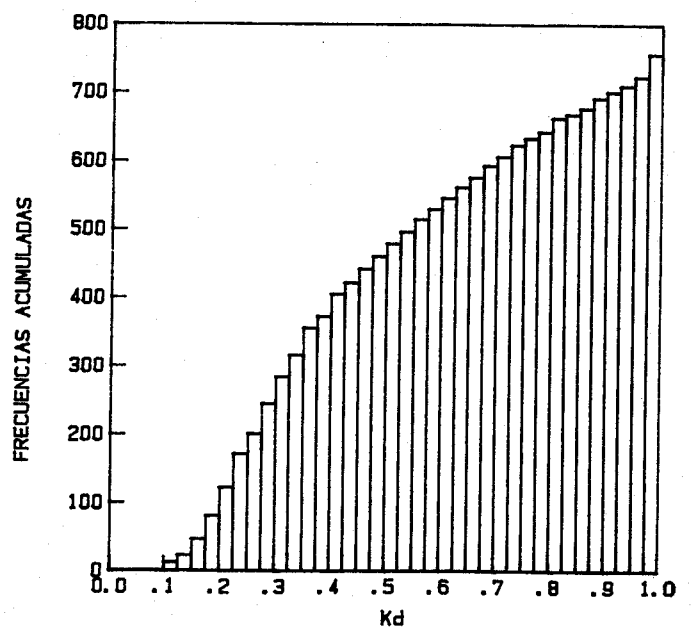


Fig. IV.17. Distribución diaria para Sevilla de frecuencias acumuladas de Kd.

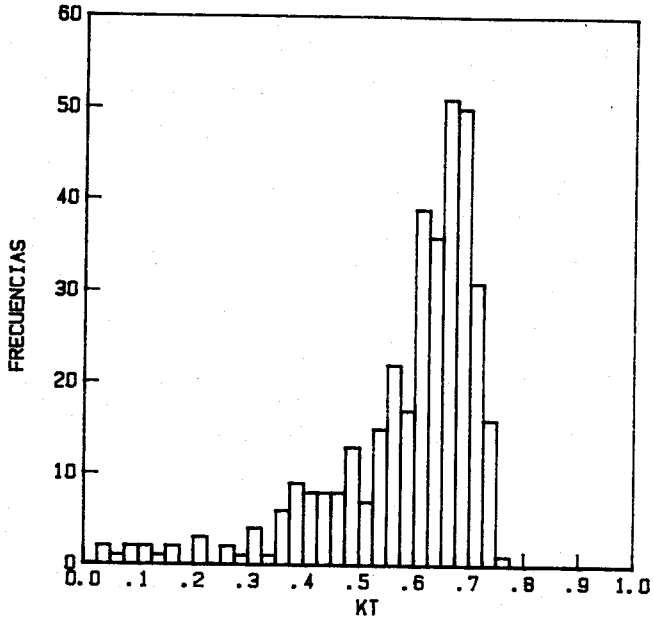


Fig. IV.18. Distribución de frecuencias diarias de Kt para Valencia.

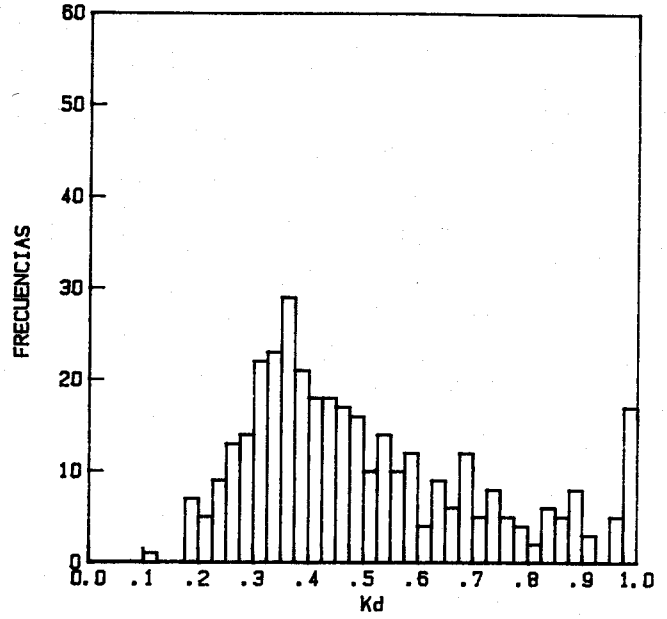


Fig. IV.19. Distribución de frecuencias diarias de Kd para Valencia.

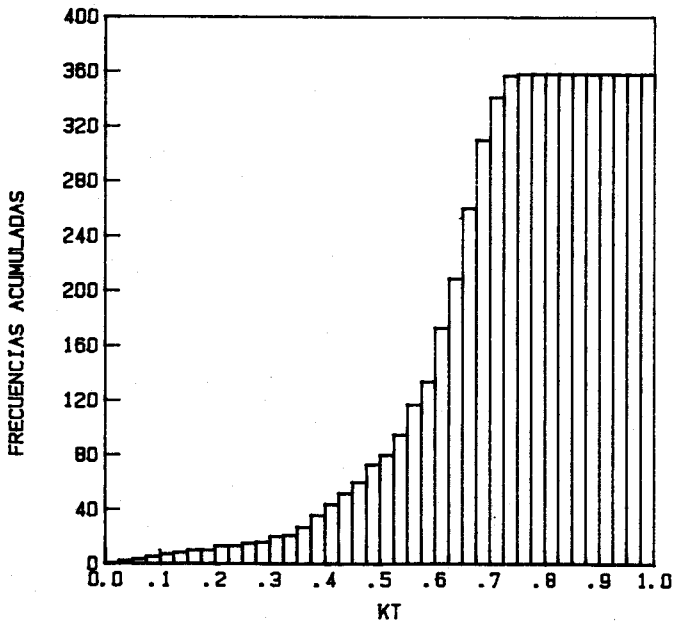


Fig. IV.20. Distribución diaria para Valencia de frecuencias acumuladas de Kt.

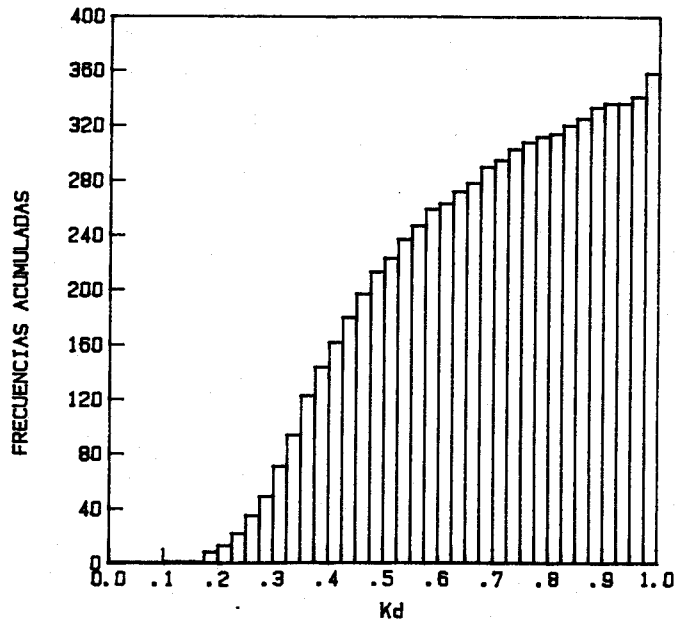


Fig. IV.21. Distribución diaria para Valencia de frecuencias acumuladas de Kd.

En las gráficas de frecuencias acumuladas de K_t , Figs. IV.12, IV.16 y IV.20, podemos observar que para un valor de K_t igual o inferior a 0.7, Sevilla dá un porcentaje del 92% de los días, lo que significa que el 8% de los días tienen un K_t superior a 0.7. Valencia dá el 95% de los días, esto es, sólo el 5% de ellos tienen un K_t superior a 0.7; finalmente, Madrid dá el 73% con K_t igual o inferior a 0.7, lo que significa que el 26,8% de los días tienen un K_t superior a 0.7. Esto confirma los resultados de las relaciones K_d - K_t que estiman una menor componente de la radiación difusa para Madrid en relación a las otras dos localidades.

En lo referente a las gráficas de frecuencias acumuladas de K_d , Figs. IV.13, IV.17 y IV.21, para Madrid hay un 43% de días con K_d igual o inferior a 0.3, lo cual nos indica que hay una buena proporción de días claros. Para Sevilla, un 32% de días tienen un K_d igual o inferior a 0.3 y para Valencia el 20% tienen un K_d igual o inferior a 0.3.

Debemos dejar constancia una vez más de que las medidas de irradiación difusa de Sevilla y Valencia han sido calculadas por diferencia entre la irradiación global horizontal y la directa normal por el seno de la altura, mientras que las medidas de irradiación difusa de Madrid están hechas con un piranómetro con banda de sombra.

IV.4.- Correlaciones decenales.

Desde el punto de vista del diseño de instalaciones, la decena es un período muy adecuado que proporciona suficiente información. Para estos usos, como el diseño de instalaciones de calefacción a través de sistemas activos que utilizan energía auxiliar empleada para accionar -

los aparatos que captan y distribuyen la radiación solar como los que no utilizan energía auxiliar ó sistemas pasivos, o bien de forma general en las aplicaciones de la energía solar a baja temperatura, en las cuales no hay necesidad de usar sistemas de concentración, el disminuir la frecuencia de los datos no mejora sensiblemente la precisión de los cálculos. Un estudio de las correlaciones \bar{K}_d , \bar{K}_t obtenido promediando las decenas correspondientes ha dado como resultado un ajuste lineal para las tres localidades.

MADRID:

La relación obtenida ha sido:

$$\bar{K}_d = 1.02 - 1.123 \bar{K}_t$$

para $0.2 \leq K_t \leq 0.8$

El coeficiente de \bar{K}_t es significativo a nivel del 99,9% de confianza.

El nivel de bondad del ajuste es moderadamente alto, siendo el coeficiente de determinación $r^2 = 0.792$, es decir, que el 79,2% de la variabilidad de \bar{K}_d es explicable linealmente por la variable \bar{K}_t . La desviación típica residual es $Se = 0.0605$.

La Fig. IV.22 muestra los valores diarios promedios decenales y el ajuste obtenido para Madrid.

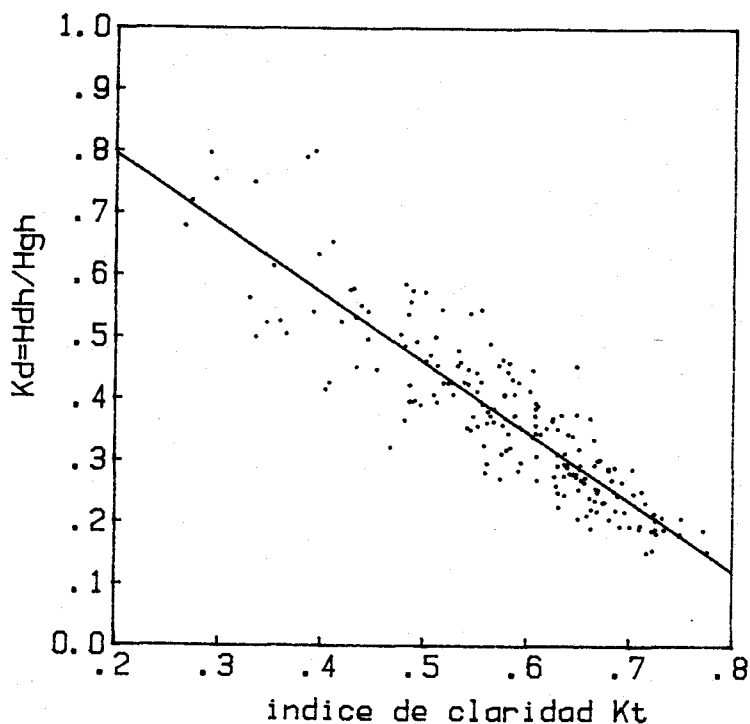


Fig. IV.22. Valores diarios promedio decenal K_t , K_d para Madrid.

SEVILLA:

La relación obtenida ha sido:

$$\bar{K}_d = 1.184 - 1.379 \bar{K}_t$$

para $0.2 \leq K_t \leq 0.8$.

El coeficiente de \bar{K}_t es significativo a nivel del 99,9% de confianza.

El nivel de bondad del ajuste es moderadamente alto, siendo el coeficiente de determinación $r^2 = 0.761$. La desviación típica residual es $Se = 0.067$.

La Fig. IV. 23 muestra los valores diarios promedios decenales y el ajuste obtenido para Sevilla.

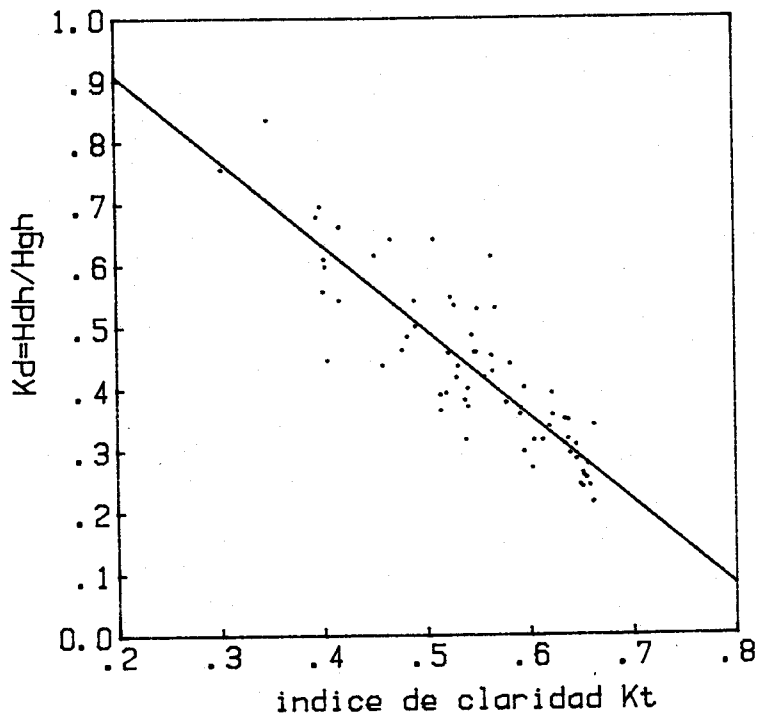


Fig. IV.23. Valores diarios promedio decenal K_t , K_d para Sevilla.

VALENCIA:

La relación obtenida ha sido:

$$\bar{K}_d = 1.032 - 0.968 \bar{K}_t$$

para $0.2 \leq K_t \leq 0.8$

El nivel de bondad del ajuste es bajo, siendo el coeficiente de determinación $r^2 = 0.483$.

La Fig. IV.24. muestra los valores diarios promedios decenales y el ajuste obtenido para Valencia.

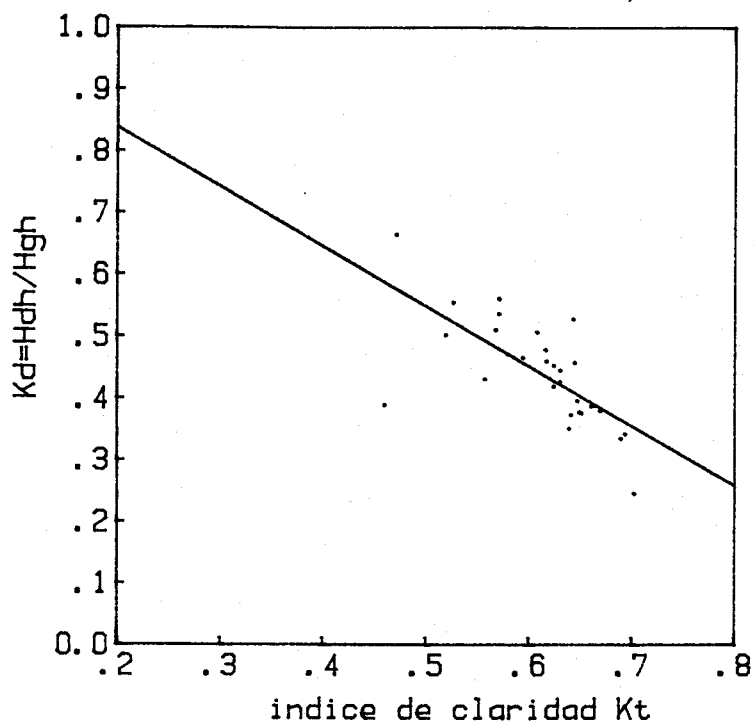


Fig. IV.24. Valores diarios promedio decenal K_t , K_d para Valencia.

Las diferencias entre las bondades de ajuste de Madrid, Sevilla - por un lado y Valencia por otro, sólo pueden deberse a que para Valencia hemos empleado pocos datos en comparación con las otras dos ciudades, pero es lo que teníamos hasta ese momento.

En ninguno de los tres casos, un ajuste cuadrático o cúbico mejoran sensiblemente el ajuste lineal, por lo que parece aceptable el modelo lineal, coincidente con Page (32).

IV.4.1.- Comparación entre las correlaciones K_d , K_t decenales.

En la Fig. IV.25 puede observarse el resultado de superponer los tres ajustes lineales obtenidos. Una vez más, sólo se puede concluir que no es aplicable una correlación única para las tres localidades.

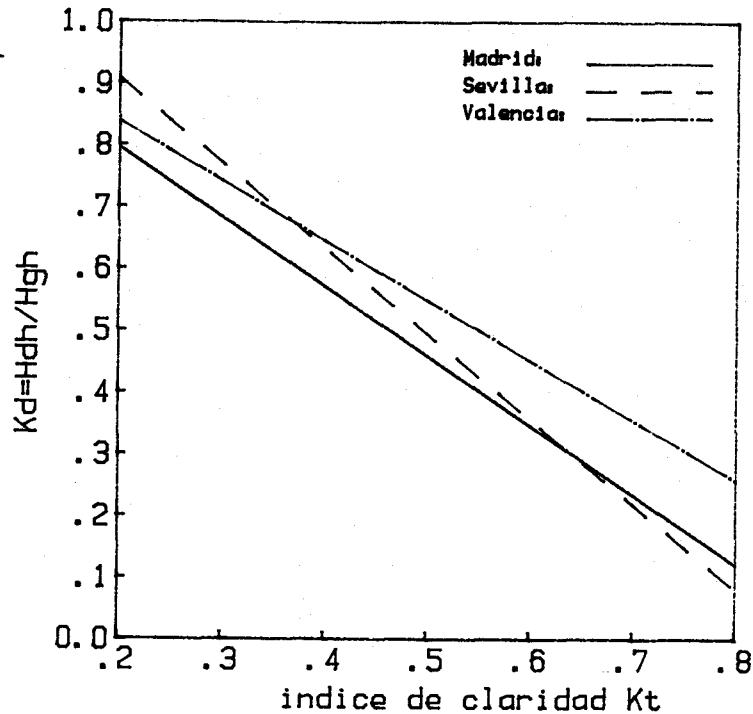


Fig. IV.25. Comparación de las correlaciones decenales obtenidas para las tres ciudades.

Se observa en la Fig. IV.25 como para Valencia siempre se obtiene una mayor componente de radiación difusa que para las otras dos localidades. Ello es explicable teniendo en cuenta el mayor contenido de humedad que posee Valencia, dada su proximidad al mar. También se observa este hecho en las correlaciones para valores diarios.

IV.5.- Correlaciones diarias promedio mensual.

Este estudio se ha hecho para Madrid y Sevilla, que son las localidades de las que teníamos un número de meses suficientemente altos de medidas simultáneas de irradiación global y difusa horizontal.

Los resultados de los ajustes obtenidos para cada ciudad han sido:

MADRID:

$$\bar{K}_d = 0.89 - 0.92 \bar{K}_t$$

para $0.3 \leq \bar{K}_t \leq 0.7$

El coeficiente de \bar{K}_t es significativo a nivel del 99,9% de confianza.

La bondad del ajuste es moderadamente alta, siendo el coeficiente de determinación $r^2 = 0.729$, es decir, el 72,9% de la variabilidad de \bar{K}_d es explicable linealmente por la variable \bar{K}_t . La desviación típica residual es $Se = 0.056$. La Fig. IV.26 muestra los valores diarios promedio mensual y el ajuste obtenido para Madrid.

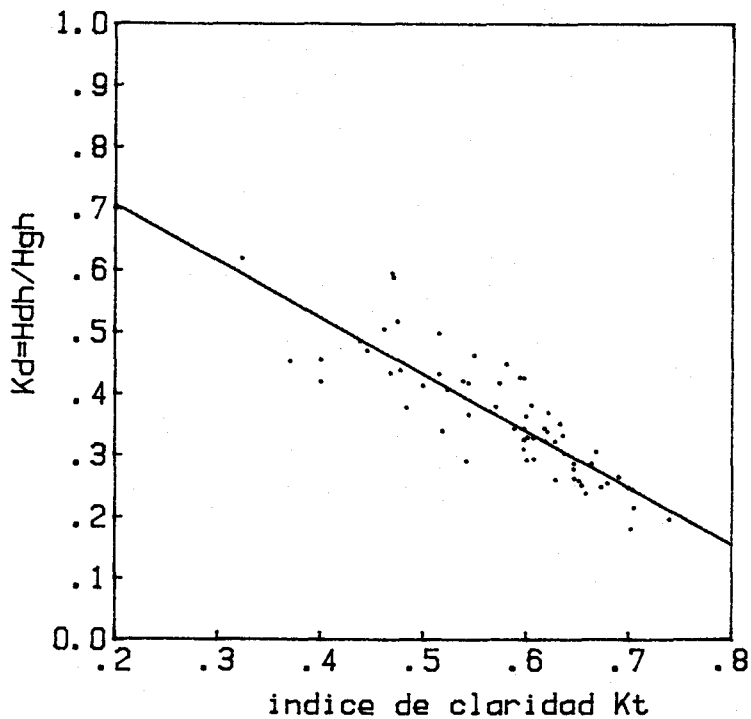


Fig. IV.26. Valores diarios promedios mensual K_t , K_d para Madrid.

SEVILLA:

El resultado del ajuste ha sido:

$$\bar{K}_d = 1.260 - 1.537 \bar{K}_t$$

para $0.3 < \bar{K}_t < 0.7$

El coeficiente de determinación es moderadamente alto, siendo $r^2 = 0.793$. La desviación típica residual es $Se = 0.070$.

La Fig. IV.27 muestra los valores diarios promedio mensual y el ajuste obtenido para Sevilla.

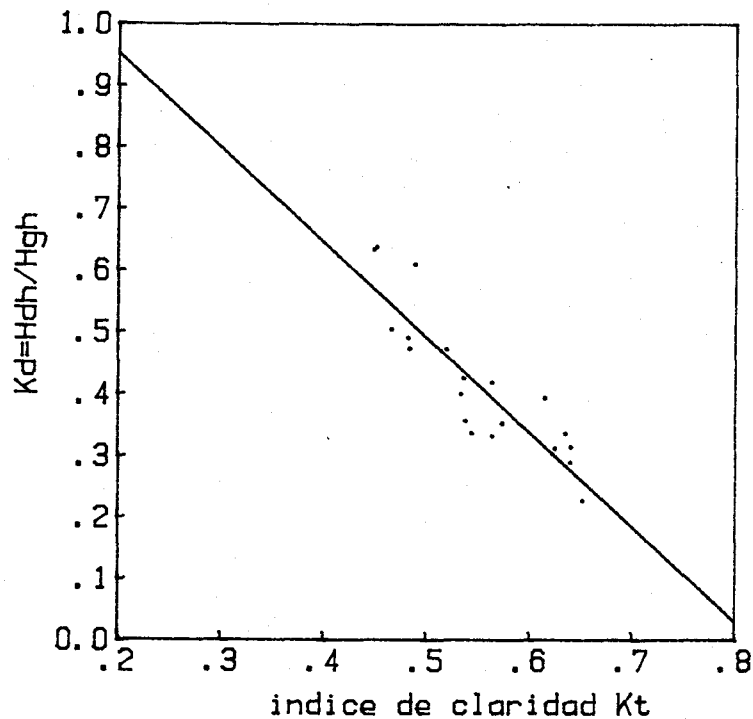


Fig. IV.27. Valores diarios promedio mensual de K_t , K_d para Sevilla.

De nuevo, como ocurre con las correlaciones decenales, los modelos cuadráticos y cúbicos no mejoran sensiblemente el modelo lineal.

IV.5.1.- Comparación entre correlaciones diarias promedio mensual.

La Fig. IV.28 nos muestra en primer lugar una comparación - entre los resultados de Sevilla y Madrid.

Se observa en la Fig. IV.28. que para valores de \bar{K}_t comprendidos entre 0.2 y 0.58 aproximadamente, el \bar{K}_d de Madrid es inferior al de Sevilla. Sin embargo, como ya ha venido ocurriendo en las correlaciones diarias y diarias promedio decenal, a partir de un determinado valor de K_t , en este caso 0.58, el \bar{K}_t de Sevilla se hace inferior al de Madrid.

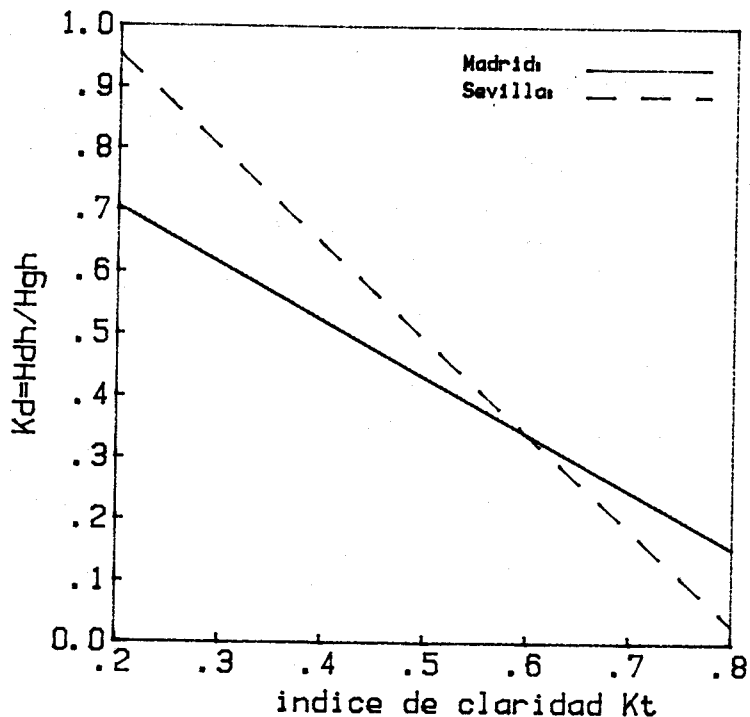


Fig. IV.28. Comparación entre las correlaciones diarias promedio mensual de Sevilla y Madrid.

De otro lado, la Fig. IV.29. muestra una comparación entre las correlaciones diarias promedio mensual de Madrid, Sevilla, Liu-Jordan (28) Muneer-Hawas (31) y Page (32).

Resulta evidente de la Fig. IV.29 que una correlación única no es aplicable a cualquier zona de la tierra.

Sólo la correlación de Page y la obtenida para Madrid pueden ser comparables, aunque resulta sorprendente el paralelismo entre la correlación de Muneer obtenida con datos de la India y la obtenida en Sevilla con nuestros propios datos, salvando la diferencia de que en Sevilla hay menos componente difusa, como se pone de manifiesto.

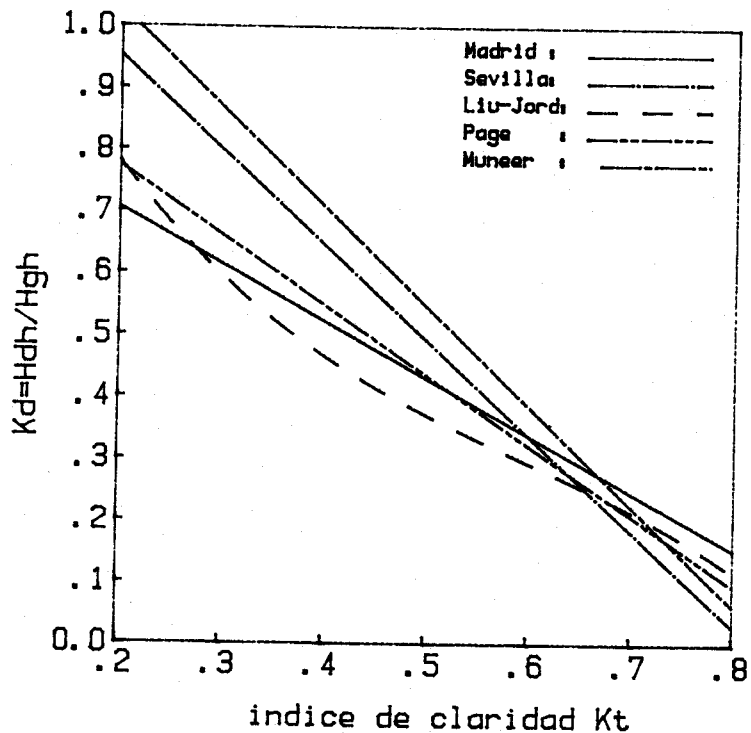


Fig. IV.29. Comparación entre distintas correlaciones diarias promedio mensual.

Las ecuaciones que se han representado en la Fig. IV.29, han sido:

$$\text{Madrid: } \bar{K}_d = 0.89 - 0.92 \bar{K}_t$$

$$\text{Sevilla: } \bar{K}_d = 1.260 - 1.537 \bar{K}_t$$

$$\text{Liu-Jordan: } \bar{K}_d = 1.39 - 4.027 \bar{K}_t + 5.532 \bar{K}_t^2 - 3.108 \bar{K}_t^3$$

$$\text{Page: } \bar{K}_d = 1.00 - 1.23 \bar{K}_t$$

$$\text{Muneer: } \bar{K}_d = 1.35 - 1.6075 \bar{K}_t$$

IV.5.2.- Estudio de distribuciones de frecuencias diarias promedio mensual para Madrid.

Debido a que al disminuir \bar{K}_t , existe una mayor dispersión de valores de \bar{K}_d , como se observa en la Fig. IV.26, se ha hecho un estudio similar al que se hizo para valores diarios, un estudio de distribuciones de frecuencias diarias promedio mensual pero sólo para Madrid, que es la localidad donde se disponía de mayor número de meses, en total 65 meses.

Las Figs. IV.30 a IV.33 muestran estos resultados. Se observa una distribución asimétrica. El máximo de la distribución en frecuencias de \bar{K}_t está situado entre 0.600 y 0.625, con un 13,8% de los meses medidos. Para la distribución de \bar{K}_d , el máximo está situado entre 0.325 y 0.350 con un 15,4% de los meses medidos.

En las gráficas de frecuencia acumulada de \bar{K}_t , Fig. IV.32, podemos observar que para \bar{K}_t igual o inferior a 0.6, el 53,8% de los meses estudiados tienen valores de \bar{K}_t iguales o inferiores a 0.6, lo que significa que un 46,2% de los meses estudiados tenían un \bar{K}_t superior a 0.6, lo que indica un alto porcentaje de días claros. En la Fig. IV.33 vemos que un 32% de los meses estudiados tienen un \bar{K}_d igual o inferior a 0.3 y que la práctica totalidad de los meses tenían un \bar{K}_d igual o inferior a 0.4. Todo lo anterior confirma que en el período estudiado para Madrid, ha existido un alto porcentaje de días claros. En este sentido, no podemos hacer un estudio comparativo con Sevilla porque no hemos dispuesto de un número de meses semejantes, pero la tendencia de las medidas registradas confirma los valores obtenidos para valores diarios y diarios promedios decenales, es decir, en Madrid (Ciudad Universitaria) existe

Un porcentaje mayor de días claros que en Sevilla. También se detecta que cuando en Sevilla el día es despejado, la componente directa es mayor que en Madrid.

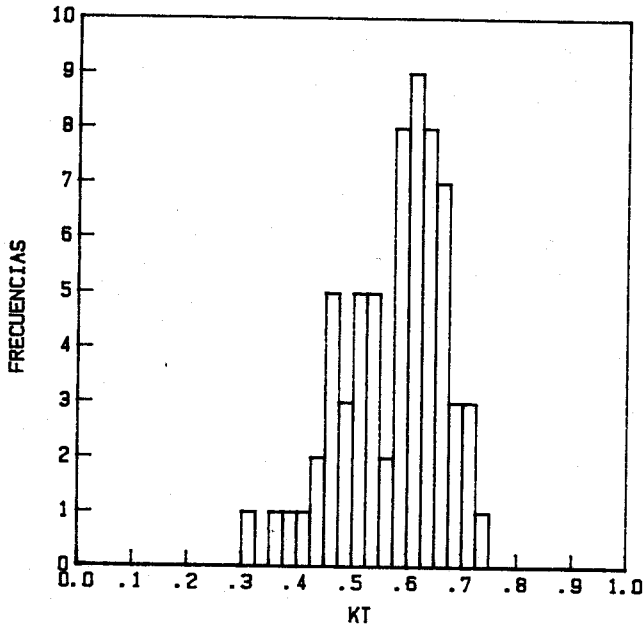


Fig. IV.30. Distribución diaria promedio mensual de frecuencias de \bar{K}_t para Madrid

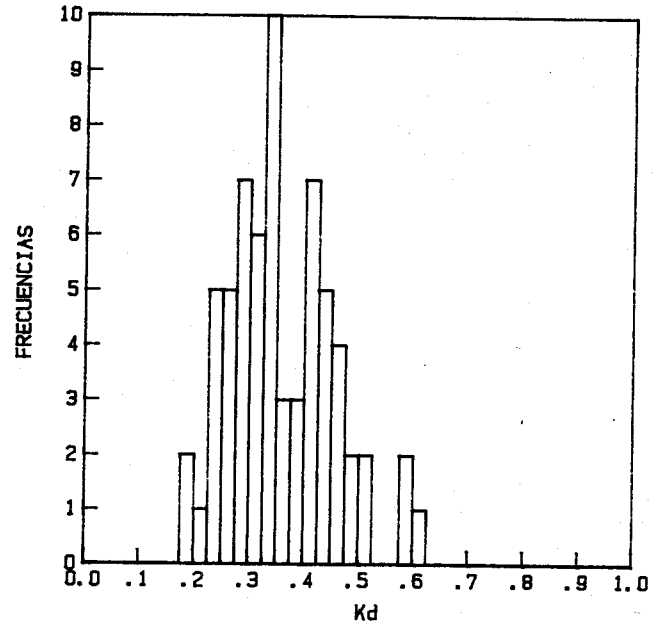


Fig. IV.31. Distribución diaria promedio mensual de frecuencias de \bar{K}_d para Madrid.

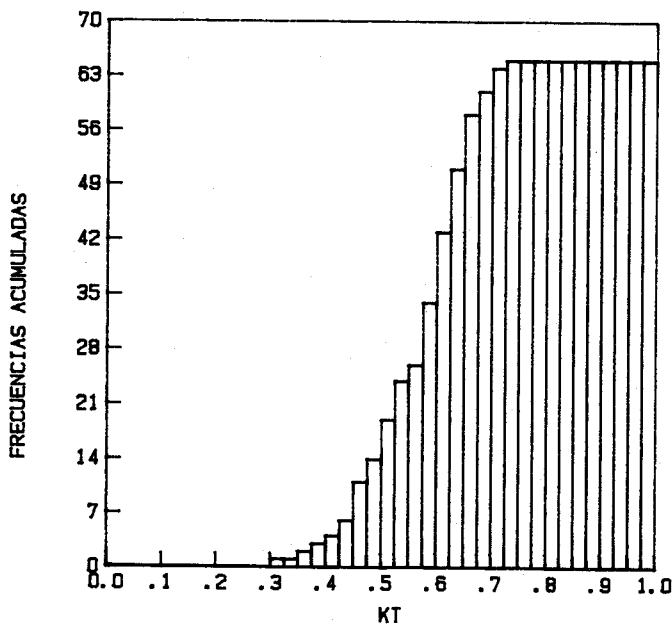


Fig. IV.32. Distribución diaria promedio mensual de frecuencias acumuladas de \bar{K}_t para Madrid.

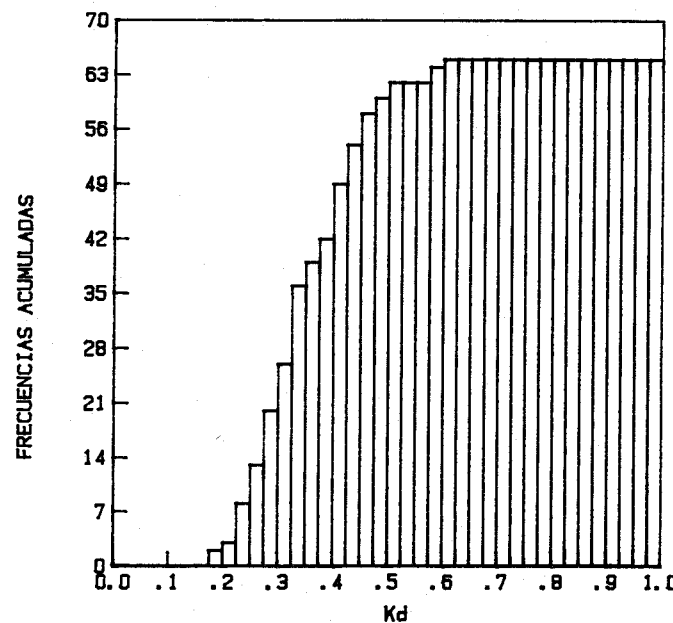


Fig. IV.33. Distribución diaria promedio mensual de frecuencias acumuladas de \bar{K}_d para Madrid.

IV.6.- Correlación entre valores horarios de la irradiación difusa horizontal y global horizontal.

La Fig. IV.34. muestra los valores individuales de K_{do} , cociente entre la irradiación horaria difusa horizontal y la irradiación horaria extraterrestre calculada, frente a K_t , para un solo año correspondiente a 1.985.

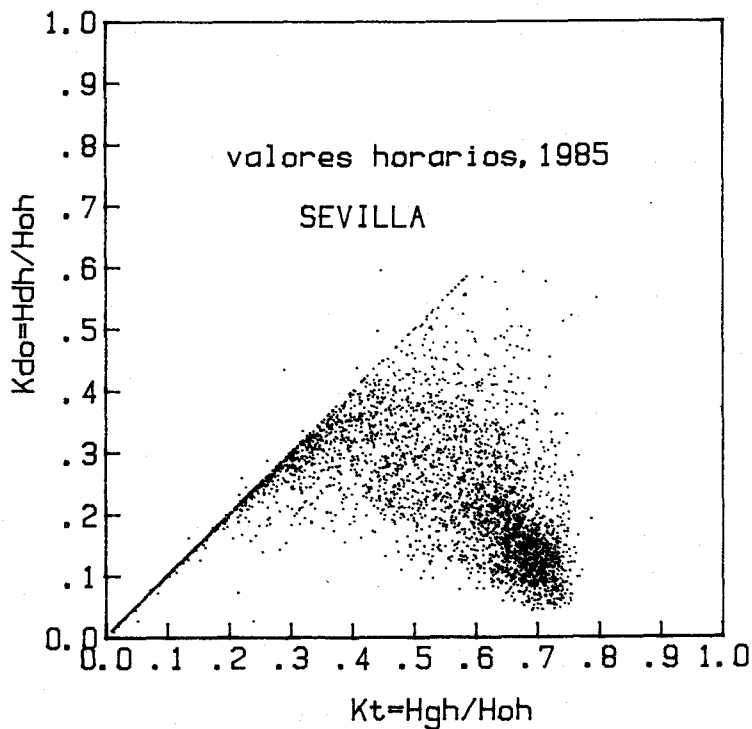


Fig.IV.34. Valores experimentales de K_t , K_{do} para Sevilla. Año 1.985.

Se observa en esta figura tal dispersión en torno a un mismo valor de K_t que cualquier intento de ajuste a estos pares de puntos directamente no conducen a un buen resultado. Esta dispersión en torno a K_t se acentúa para valores de K_t comprendidos entre 0.35 y 0.65 aproximadamente, volviendo de nuevo a agruparse fuertemente en torno a un K_t superior a 0.65.

Este hecho refleja prácticamente los tres estados en que podíamos clasificar el cielo, esto es: a) cielo cubierto, donde la radiación

difusa horizontal es igual a la radiación global horizontal, esto se observa en la Fig. IV.34, por el tramo rectilíneo que pasa por el origen de coordenadas; b) el cielo parcialmente cubierto, que podríamos localizarlo entre 0.35 a 0.65, y c) cielo claro, a partir de K_t superior a 0.65, aproximadamente.

En cielos despejados se observa la dispersión en torno a un mismo valor de K_t . Es decir, para K_t superior a 0.65, aunque es más probable encontrar un K_{do} en torno a 0.1 y 0.2, sin embargo, también se encuentran valores de 0.3 y 0.4. El origen de este fenómeno hay que buscarlo en los diferentes contenidos de aerosoles y distribución vertical de los mismos, el tamaño de estos aerosoles, en el espesor de agua precipitable, etc., en el período en que se estuvo haciendo la medida de H_{gh} y H_{dh} .

En un cielo aparentemente claro, un cielo celeste, el ojo es incapaz de detectar aerosoles o vapor de agua, pero los instrumentos sí que pueden detectar menos o más componente difusa de la radiación, y sin embargo miden la misma cantidad de radiación global horizontal, Este fenómeno justifica el hecho de que para un mismo K_t obtengamos distintos K_{do} . y será analizado en el capítulo VI de esta tesis.

En consecuencia, es prácticamente imposible obtener una buena correlación entre la difusa horaria y la global horaria, ya que necesitaríamos haber tenido medidas simultáneas de los parámetros meteorológicos señalados: aerosoles, tamaño de aerosoles, contenido de vapor de agua de la atmósfera, etc.

Mientras se recaba información acerca de estos parámetros para poder obtener una correlación multivariante entre los distintos parámetros físicos que intervienen en la estimación de la radiación -

difusa, se han buscado soluciones al problema que aportan un mayor conocimiento para estimar la radiación difusa horizontal a partir de la radiación global horizontal.

Estas soluciones las dividimos en dos grupos: a) aquellos que estiman la componente difusa de la radiación a partir de valores promediados, dando por tanto el valor medio de H_{dh} para un K_t dado y b) aquellas que estiman la componente difusa de la radiación utilizando el valor más probable que corresponde a un valor de K_t . Este segundo procedimiento lo estudiamos en el capítulo VI de esta tesis, por representar un nuevo enfoque en este tipo de problemas.

IV.6.1.- Estimación de la irradiación difusa promedio horaria a partir de K_t .

Tomando todos los datos horarios de irradiación difusa y global horizontal medidos entre 1984 y mayo de 1986, en total 6499 pares de puntos K_t, K_{do} , se ha dividido la abscisa K_t en intervalos de 0.05 y en cada intervalo se ha obtenido el valor promedio de K_{do} . El resultado se observa en la Fig. IV.35.

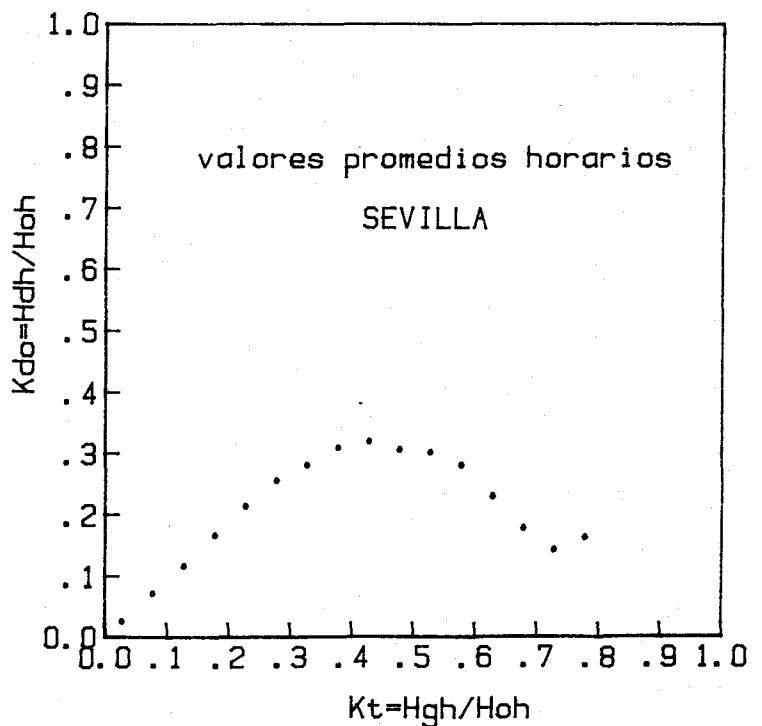


Fig. IV.35. Valores promedios de K_{do}, K_t .

El ajuste de estos pares de valores se ha intentado por tres procedimientos distintos : 1) Un simple ajuste polinómico de grado tres. El resultado ha sido negativo porque un intento de la curva en ajustarse a los puntos superiores a un Kt igual a 0.4 daba lugar a un desajuste de la recta que pasa por el origen y que se prolonga aproximadamente hasta 0.35; 2) Ajuste polinómico, pero imponiendo la condición de que la curva debería ser una recta hasta un determinado valor de Kt .

Este último procedimiento mejoró sensiblemente la bondad del ajuste. A continuación se detalla el proceso seguido:

Se trata de ajustar los pares de puntos a un modelo matemático con restricciones. Este modelo tiene la forma:

$$(1) \quad y = (1 - D) a x + D (b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3)$$

siendo D un parámetro definido en función de una situación física observable, de tal forma que:

$$(2) \quad D = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq x_0 \\ 1 & \text{si } x > x_0 \end{cases}$$

Las restricciones que se le imponen al modelo son:

a) Continuidad de la función en el punto $P_0 (x_0, y_0)$. Esto conduce a :

$$(3) \quad ax_0 = b_0 + b_1 x_0 + b_2 x_0^2 + b_3 x_0^3$$

b) Continuidad de la derivada en $P_0 (x_0, y_0)$. Conduce a:

$$(4) \quad a = b_1 + 2b_2 x_0 + 3b_3 x_0^2$$

c) Obligación de pasar la curva por $P_0 (x_0, y_0)$; con lo que

$$(5) \quad a = \frac{y_0}{x_0}$$

Hay que decir que el punto de corte entre las distribuciones rectilíneas y polinómicas, aunque se observan a simple vista de los puntos experimentales, se ha obtenido por un procedimiento matemático riguroso, como ha sido la aplicación del test de Rubens. En esencia, este test, implementado en ordenador por nosotros, programa TRUBENS, proporciona cual es el punto x_0, y_0 , para el cual la recta, es recta con un nivel de significación fijado a priori, por ejemplo, con un 99,9% o con un 95%, etc.

De las combinación de las ecuaciones (3), (4) y (5) se obtiene b_2 y b_3 en función de b_0 , b_1 , x_0 e y_0 :

$$b_2 = \frac{2y_0 - 3b_0 - 2b_1x_0}{x_0^2} \quad (6)$$

y

$$b_3 = \frac{2b_0 + b_1x_0 - y_0}{x_0^3} \quad (7)$$

Llamando:

$$A1 = \sum Xi; \quad A2 = \sum Xi^2; \quad A3 = \sum Xi^3; \quad A4 = \sum Xi^4; \quad A5 = \sum Xi^5;$$

$$A6 = \sum Xi^6; \quad AOY = \sum Yi; \quad A1Y = \sum Xi \cdot Yi; \quad A2Y = \sum Xi^2 Yi;$$

$$A3Y = \sum Xi^3 \cdot Yi.$$

El sistema de ecuaciones planteado para resolver el ajuste - es de la forma:

$$\begin{pmatrix} n & A1 & A2 & A3 \\ A1 & A2 & A3 & A4 \\ A2 & A3 & A4 & A5 \\ A3 & A4 & A5 & A6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AOY \\ A1Y \\ A2Y \\ A3Y \end{pmatrix} \quad (8)$$

siendo n el n° de puntos ajustados.

Del sistema de ecuaciones (8), despejamos b_0 y b_1 en función de los pares de puntos a ajustar, quedando:

$$\begin{aligned} nb_0 + A1 \cdot b_1 + A2 \left(\frac{2Y_0 - 3b_0 - 2b_1x_0}{x_0^2} \right) + A3 \left(\frac{2b_0 + b_1x_0 - Y_0}{x_0^3} \right) = \\ = AOY \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A1 \cdot b_0 + b_1 + A3 \left(\frac{2Y_0 - 3b_0 - 2b_1x_0}{x_0^2} \right) + A4 \left(\frac{2b_0 + b_1x_0 - Y_0}{x_0^3} \right) = \\ = A1Y \end{aligned} \quad (10)$$

Desarrollando la expresión (9) y agrupando términos se obtiene:

$$\begin{aligned} \left(\frac{2Y_0}{x_0^2} A2 - \frac{Y_0}{x_0^3} A3 - AOY \right) + b_0 \left(n - \frac{3A2}{x_0^2} + \frac{2A3}{x_0^3} \right) + \\ + b_1 \left(A1 - \frac{2A2}{x_0} + \frac{A3}{x_0^2} \right) = 0 \end{aligned}$$

Y llamando C1 al término independiente, C2 al término en b_0 y C3 - al término en b_1 queda finalmente:

$$C1 + b_0 C2 + b_1 C3 = 0 \quad (11)$$

donde :

$$C1 = \frac{2Y_0}{x_0^2} A2 - \frac{Y_0}{x_0^3} A3 - A0Y$$

$$C2 = n - \frac{3A2}{x_0^2} + \frac{2A3}{x_0^3}$$

$$C3 = A1 - \frac{2A2}{x_0} + \frac{A3}{x_0^2}$$

Realizando un proceso idéntico para la expresión (10) nos conduce

a:

$$D1 + b_0 D2 + b_1 D3 = 0 \quad (12)$$

siendo

$$D1 = \frac{2Y_0}{x_0^2} A3 - \frac{Y_0}{x_0^3} A4 - A1Y$$

$$D2 = A1 - \frac{3A3}{x_0^2} + \frac{2A4}{x_0^3}$$

$$D3 = A2 - \frac{2A3}{x_0} + \frac{A4}{x_0^2}$$

Finalmente, obtenemos el sistema de ecuaciones (11) y (12), en las cuales, eliminando b_1 y b_0 en función de los parámetros $C1$, $C2$, $C3$ y $D1$, $D2$ y $D3$ conduce a la siguiente solución:

$$b_0 = - \frac{C1 \cdot D3 - D1 \cdot C3}{C2 \cdot D3 - D2 \cdot C3} \quad (13)$$

$$b_1 = - \frac{C1 \cdot D2 - D1 \cdot C2}{C3 \cdot D2 - D3 \cdot C2} \quad (14)$$

En resumen, partiendo del punto de corte previamente establecido con el test de Rubens, del número de puntos a ajustar y de los puntos experimentales, se obtiene a partir de (13) y (14) los valores de los coeficientes b_0 y b_1 del polinomio. Conocidos estos coeficientes y por medio de las ecuaciones (6) y (7) se obtiene b_2 y b_3 respectivamente. Todo esto ha sido realizado por medio del programa "AJUSTE-P3R", es decir, ajuste de un polinomio de grado tres con restricciones.

La bondad del ajuste ha sido estimada mediante el coeficiente de determinación r cuadrado definido en (39) y que toma la forma:

$$R^2 = 1 - \frac{S1}{S2}$$

siendo

$$S1 = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{E_i})^2$$

$$S2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_M)^2$$

donde Y_i es el valor medido, Y_{E_i} es el valor estimado por el modelo y Y_M el valor medio de los valores medidos.

Esta forma de definir R^2 según demuestra T. O. Kvalseth en (39) es válida para todo tipo de ajuste. También hemos calculado el error cuadrático medio estándar o error RMSE, definido por :

$$RMSE = \left| \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{E_i})^2 / n \right|^{1/2}$$

y el error promedio residual, MAE, definido por

$$MAE = \sum_{i=1}^n | Y_i - YE_i | / n$$

Con todo ello, el resultado del ajuste con restricciones se muestra en la Fig. IV.36.

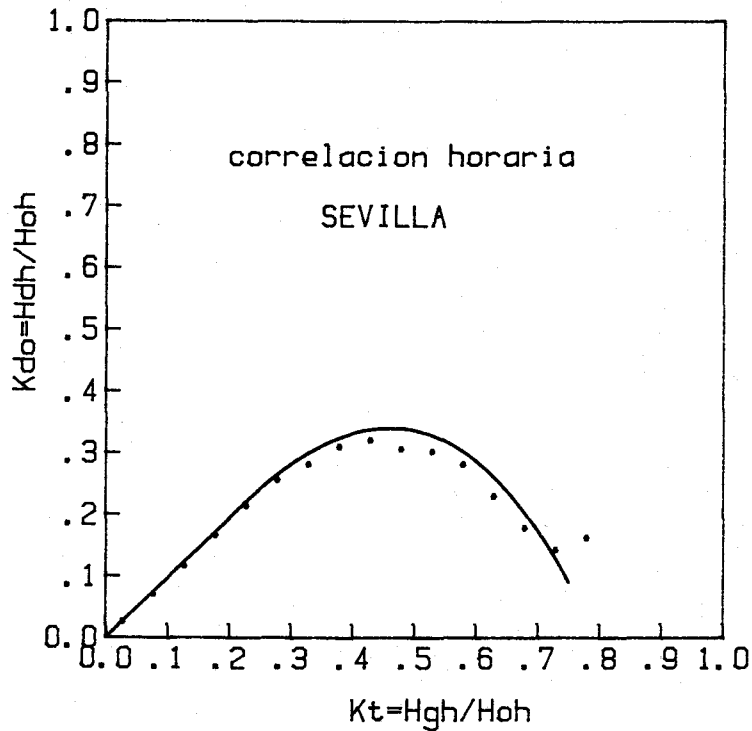


Fig. IV.36. Ajuste polinómico K_{do} , K_t con restricciones.

La ecuación obtenida ha sido:

$$K_d = (1 - D) \frac{Y_0}{x_0} \cdot K_t + D \cdot (-0.0674 + 1.493 K_t - 0.7014 K_t^2 - 1.346 K_t^3)$$

donde $x_0 = 0.2266$; $Y_0 = 0.21937$

de tal forma que:

$$D = 0 \quad \text{si} \quad K_t \geq x_0$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad K_t < x_0$$

El coeficiente de determinación ha sido:

$$r^2 = .9217; \text{ el error RMSE ha sido}$$

$$\text{RMSE} = 2,79 \cdot 10^{-2} \text{ y el error MAE ha sido}$$

$$\text{MAE} = 1,58 \cdot 10^{-2}$$

No obstante, el buen resultado obtenido para el coeficiente de determinación, se observa de la Fig. IV.36 que el último punto experimental aparece un Kdo más elevado que el anterior, intentando la curva una subida a partir del Kt aproximadamente igual a 0.7. Este hecho físico aparece en distintas publicaciones, entre otros las de Iqbal (24).

Por este motivo hemos intentado un nuevo ajuste que recoja - matemáticamente este fenómeno.

3) Ajuste en serie de Fourier.

Se propone en este apartado un ajuste de la forma:

$$Y = (1 - D) \cdot a \cdot x + D \cdot P(x)$$

donde P(x) es un desarrollo en serie de Fourier con 1 ó 2 armónicos como máximo, tomando la forma:

$$P(x) = A_0 + A_1 \cdot \cos(Wx) + B_1 \sin(Wx)$$

$$+ A_2 \cos(2Wx) + B_2 \sin(2Wx) =$$

$$= A_0 + C_1 \cdot \cos(Wx - \psi_1) + C_2 \cdot \cos(2Wx - \psi_2)$$

en donde

$$A_0 = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n$$

$$A_1 = 2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \cos(Wx_i) \right] / n$$

$$B_1 = 2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sin (W X_i) \right] / n$$

$$A_2 = 2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \cos (2W X_i) \right] / n$$

$$B_2 = 2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sin (2W X_i) \right] / n$$

$$W = 360/PE$$

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} ; \quad C_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2} ; \quad \psi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{A_1} \right) \text{ y}$$

$$\psi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{B_2}{A_2} \right)$$

donde PE representa el período ajustado y que en nuestro caso representa la diferencia entre el último valor ajustado de Kt y el primero.

Todo esto se ha hecho a través del programa de ordenador "AJUSTCOFU", ajuste de coeficientes de Fourier.

Por otra parte, el punto de corte X_0 , Y_0 , se ha buscado de tal forma que el coeficiente de determinación del ajuste de Fourier fuera máximo.

El resultado de todo ello puede verse en la Fig. IV.37 para un armónico y la Fig. IV.38 para dos armónicos.

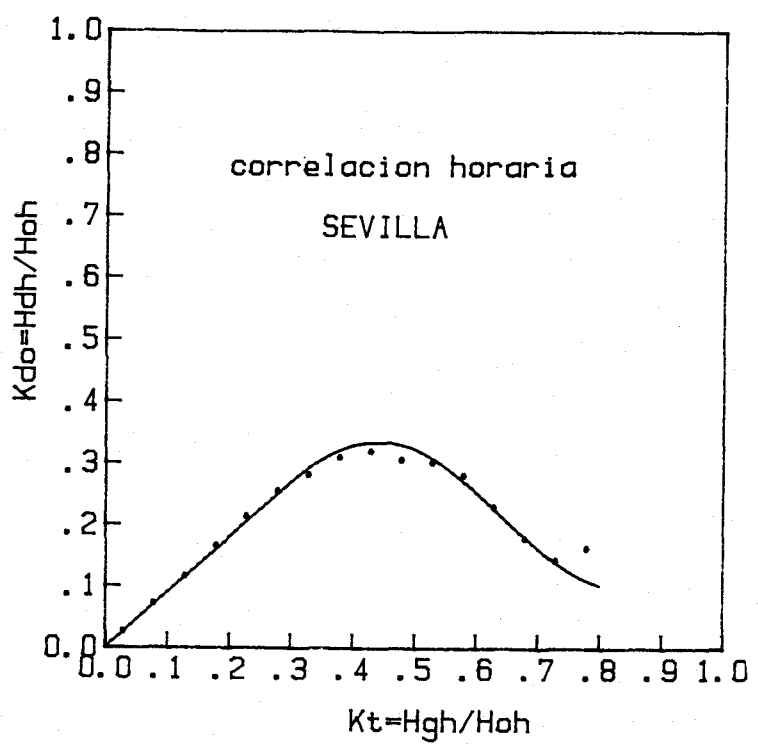


Fig. IV.37. Ajuste de Fourier K_{do} , K_t con un armónico.

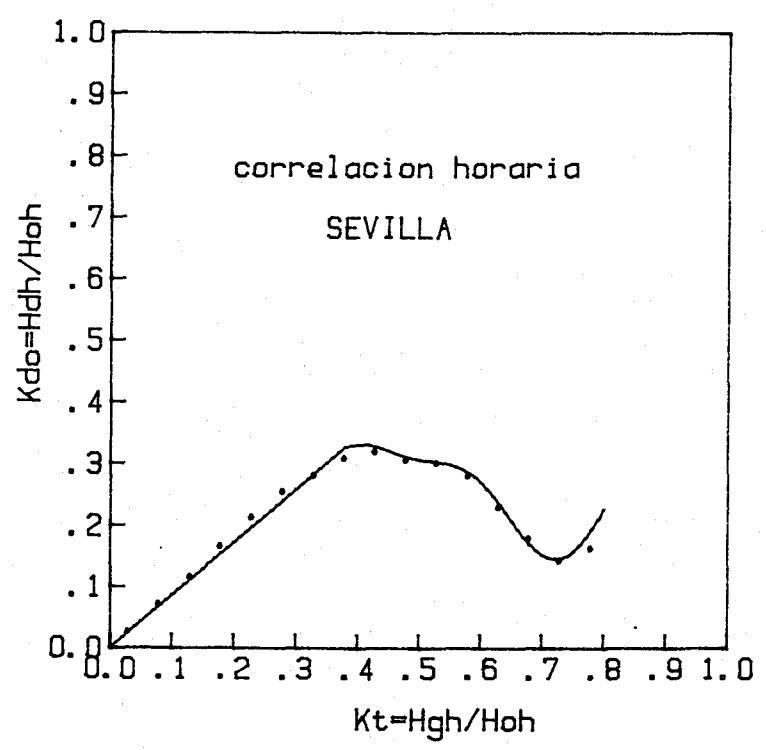


Fig. IV. 38. Ajuste de Fourier K_{do} , K_t con dos armónicos.

La ecuación proporcionada para un armónico ha sido:

$$Kdo = 0.8986 (1 - D) Kt + D (0.2156 + 0.1196 \cos (450 Kt - 198)) \quad (15)$$

donde

$$D = \begin{cases} 0 & \text{si } Kt \leq 0.3 \\ 1 & \text{si } Kt > 0.3 \end{cases}$$

El coeficiente de determinación es:

$$r^2 = 0.92$$

el error RMSE vale $2.45 \cdot 10^{-2}$ y el error MAE vale $0.1594 \cdot 10^{-2}$

Para dos armónicos, la ecuación se ha ajustado a valores de Kt superiores a 0.3. El resultado ha sido:

$$Kdo = (1 - D) 0.86 Kt + D (0.257 + 0.085 \cos (720 Kt - 331.3) + 0.029 \cos (2.720 Kt - 152))$$

$$\text{donde } D = \begin{cases} 0 & \text{si } Kt \leq 0.38 \\ 1 & \text{si } Kt > 0.38 \end{cases}$$

Esta ecuación da un coeficiente de determinación $r^2 = 0.977$, un error RMSE igual a $9,65 \times 10^{-3}$ y un error MAE de 0.0074. Con un sólo armónico el coeficiente de determinación bajó a 0.92.

Es de resaltar que el ajuste de Fourier con dos armónicos está hecho para puntos Kt superiores a 0.3, con objeto de que se adapte la curva lo mejor posible a los puntos. La flexibilidad de un ajuste de este tipo es evidente en relación a los puntos ajustados.

La ecuación con dos armónicos se ajusta mejor sobre todo - a partir de Kt igual a 0.4, recogiendo esta ecuación las variaciones que se producen en el Kdo de una forma casi perfecta, como

puede observarse en la Fig. IV.38. Sin embargo, la ecuación con un armónico es de más fácil utilización y proporciona resultados muy análogos a la anterior, por lo que en conclusión se propone como correlación horaria para Sevilla la ecuación:

$$\underline{K_{do} = 0.89 K_t (1 - D) + D (0.215 + 0.119 \cos (450 K_t - 198))} \quad (15)$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad K_t \leq 0.3$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad K_t > 0.3$$

IV.6.2.- Estudio comparativo de correlaciones horarias de K_{do} , K_t .

En este apartado vamos a realizar un estudio en el que se comparan las correlaciones de I_{qbal} en función de la altura solar y la correlación horaria dada por la ecuación 15, obtenida para Sevilla. Para conseguir nuestro objetivo, hemos tenido que darle forma analítica a las correlaciones de I_{qbal} . Las correlaciones de I_{qbal} (24) vienen expresadas de una manera gráfica por la Fig. IV.39.

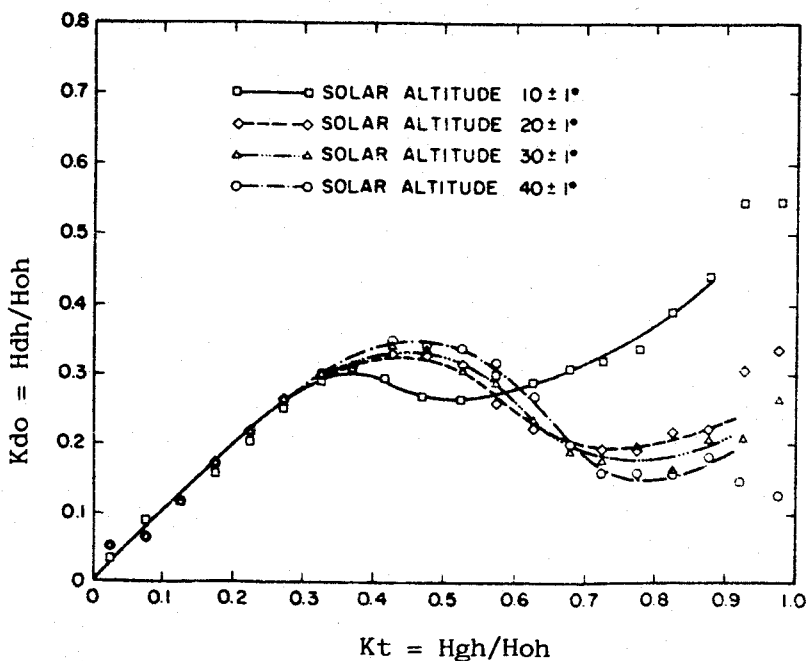


Fig.IV.39. Variación de la irradiación - difusa horaria con la irradiación global horaria horizontal en función de la altura - del sol. Adaptado de (40).

Se ha obtenido una expresión analítica de la expresión $K_{do}-K_t$, para cada altura del sol (de 10 en 10 grados) ajustando los puntos experimentales a ecuaciones similares a las que hemos encontrado nosotros aplicando la misma técnica ya descrita en el apartado anterior. Los resultados se pueden ver en las Figs. IV.40 a IV.43.

Para una altura de 10° , resulta mejor un ajuste por medio de una función polinómica de 4º grado que el correspondiente de Fourier:

$$K_{do} = 0.935 K_t (1 - D) + D (-0.58 + 6.43 K_t - 16.75 K_t^2 + 17.87 K_t^3 - 6.42 K_t^4)$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad K_t \leq 0.275$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad K_t > 0.275$$

El coeficiente de determinación ha sido de 0.953.

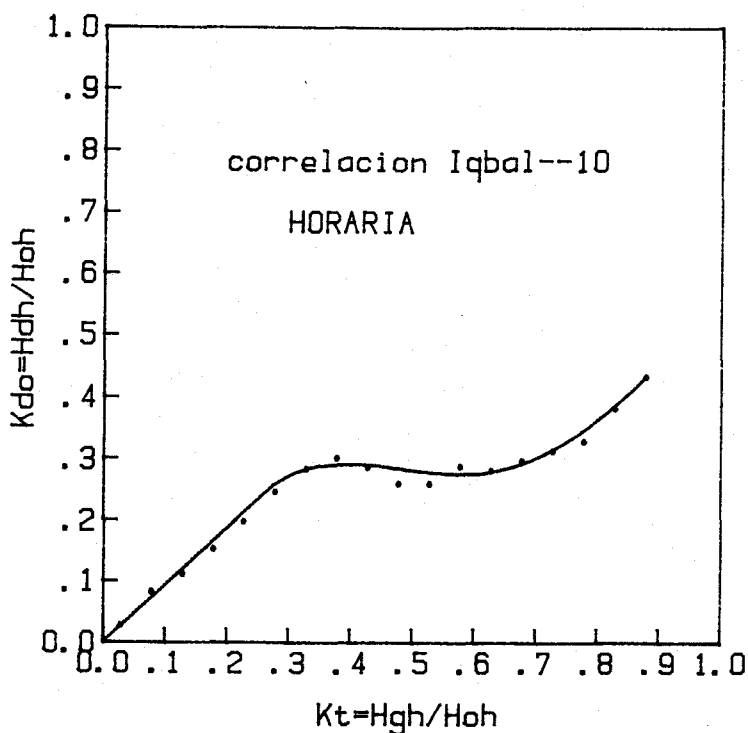


Fig.IV.40. Variación de K_{do} frente a K_t para una altura del sol de 10° .

Para una altura del sol de 20° , un ajuste de Fourier con un sólo armónico proporciona un buen resultado. La ecuación obtenida ha sido:

$$K_{do} = 0.91 K_t (1 - D) + D (0.258 + 0.067 \cos (553 K_t - 236))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad K_t \leq 0.325$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad K_t > 0.325$$

El coeficiente de determinación ha sido de 0.97.

En la Fig. IV.41 pueden observarse los puntos experimentales ajustados.

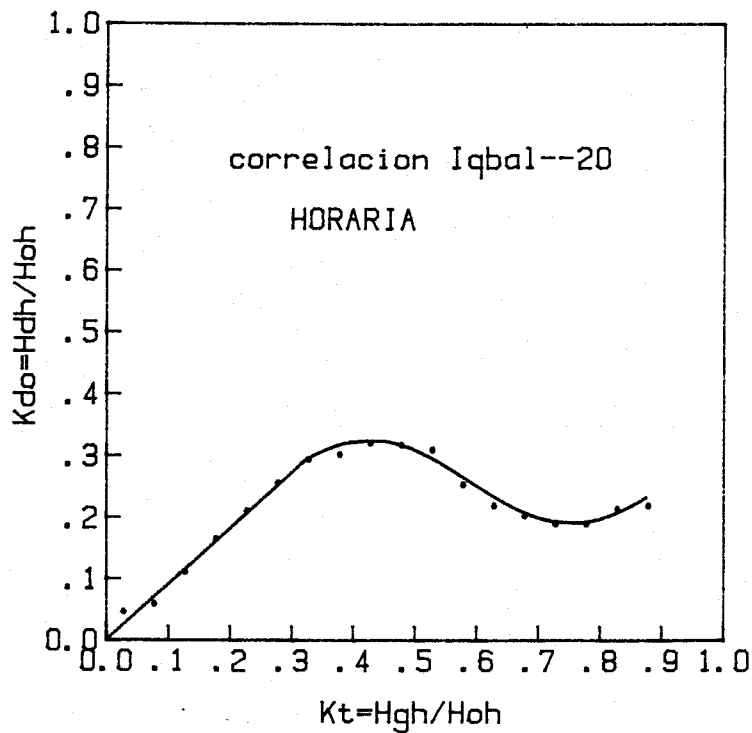


Fig. IV.41. Variación de K_{do} frente a K_t para una altura del sol de 20° .

Para alturas de 30° y 40° se obtienen resultados similares.-

Las ecuaciones obtenidas han sido las siguientes:

Altura de 30° :

$$K_{do} = 0.89 K_t (1 - D) + D (0.253 + 0.083 \cos (553 K_t - 243))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad Kt \leq 0.325$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad Kt > 0.325$$

El coeficiente de determinación ha sido de 0.96.

Altura de 40° :

$$Kdo = 0.87 Kt (1 - D) + D (0.254 + 0.1 \cos (553 Kt - 253))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad Kt \leq 0.35$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad Kt > 0.35$$

El coeficiente de determinación ha sido de 0.96.

Las Figs. IV.42 y IV.43 muestran los puntos experimentales y el ajuste obtenido para 30 y 40 grados de altura del sol, respectivamente.

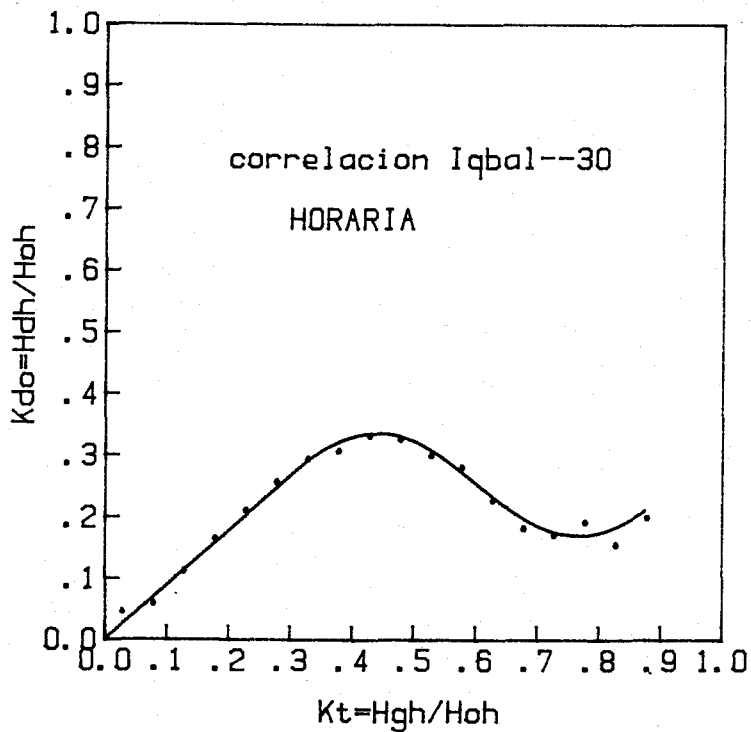


Fig. IV.42. Variación de Kdo frente a Kt para una altura del sol - de 30°.

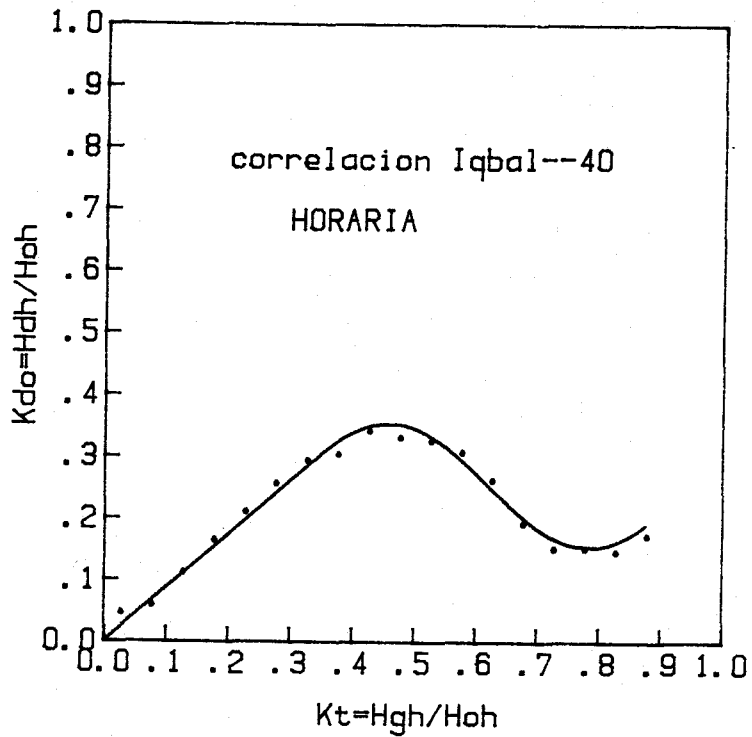


Fig. IV.43. Variación de Kdo frente a Kt para una altura del sol - de 40°.

La comparación de las ecuaciones horarias de Iqbal en función de la altura solar y la correlación horaria de Sevilla, obtenida a partir de un desarrollo de Fourier con uno y dos armónicos, puede verse en las Fig. IV.43 y IV.44.

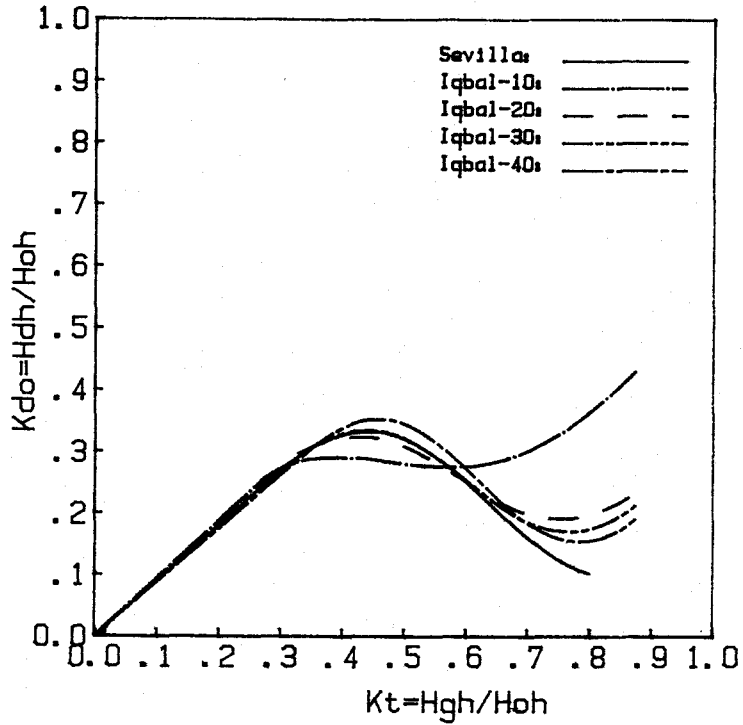


Fig. IV.44. Comparación de las correlaciones horarias de Iqbal y la obtenida para Sevilla con un armónico.

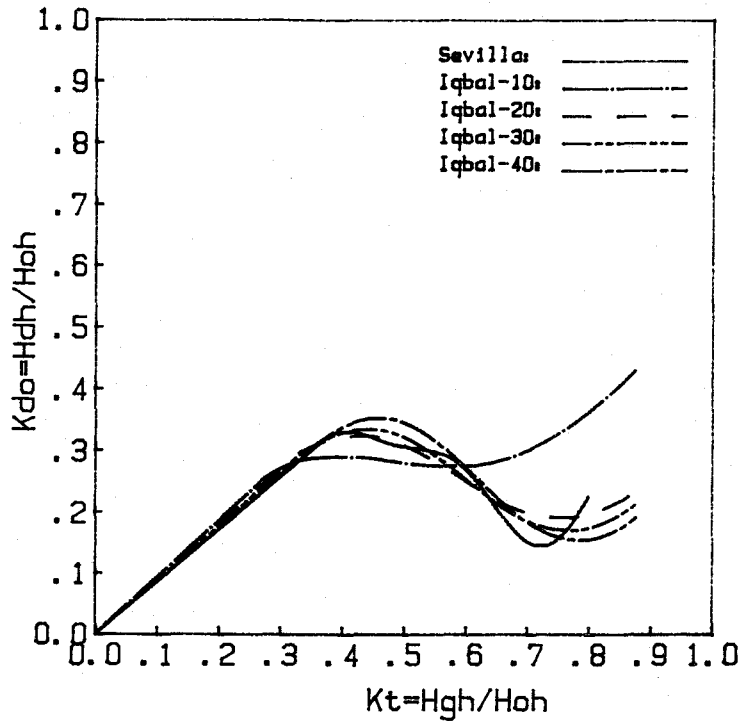


Fig. IV.45. Comparación de las correlaciones horarias de Iqbal y la obtenida para Sevilla con dos armónicos.

Resulta evidente de las Figs. IV.43 y IV.44 que salvo la correlación K_{do} , K_t para la altura de 10° , el resto de las correlaciones tienen formas semejantes y entre ellas no hay diferencias muy significativas al querer obtener un valor de K_{do} para un determinado valor de K_t .

Para este tipo de correlaciones horarias, podemos concluir que el utilizar la altura del sol como parámetro de la correlación no va a aportar una mejora en los resultados obtenidos.

Finalmente, proponemos la correlación horaria de Sevilla porque ha sido obtenida sin tener en cuenta la altura del sol como parámetro y resulta más sencilla su aplicación. Esta ecuación es:

$$K_{do} = 0.89 K_t (1 - D) + D (0.215 + 0.1196 \cos (450 K_t - 198))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad K_t \leq 0.3$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad K_t > 0.3$$

Esta ecuación es válida para valores de K_t comprendidos entre 0 y 0.8.

No se ha hecho el estudio de las correlaciones K_{do} - K_t con valores horarios para Sevilla con la altura como parámetro, por las razones que se exponen en el capítulo siguiente.



CAPITULO V.

IRRADIANCIA SOLAR DIFUSA A PARTIR DE LAS MEDIDAS
DE IRRADIANCIA GLOBAL, UTILIZANDO LA ALTURA DEL SOL
COMO PARAMETRO

CAPITULO V

IRRADIANCIA SOLAR DIFUSA A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE
IRRADIANCIA GLOBAL, UTILIZANDO LA ALTURA DEL SOL COMO
PARAMETRO.V.1.- Introducción y antecedentes.

Bugler (25), con datos de una estación en Australia, obtiene unas correlaciones horarias entre la irradiación difusa horizontal y la irradiación global horizontal válidas para ciertas alturas del sol. Tuvo en cuenta el efecto de la altura del sol al representar los datos separadamente cada 10 grados de altitud, obteniendo de esta manera el mejor ajuste de los datos.

Iqbal (24) trata de reforzar la línea de trabajo señalada por Bugler (25) y con los datos de tres estaciones en Canadá y dos estaciones en Francia, obtiene de forma gráfica correlaciones horarias entre los cocientes de irradiación difusa y extraterrestre horizontales y de irradiación global y extraterrestre horizontales para alturas del sol comprendidas entre 10° y 40° , con intervalos de 10° .

Iqbal, encuentra discrepancia entre los resultados obtenidos entre las estaciones canadienses y francesas para cielos despejados y alturas comprendidas entre 10° y 20° respectivamente, señalando la necesidad de esclarecer el hecho. También señala Iqbal la conveniencia de establecer este mismo tipo de correlaciones para alturas del sol superiores a los 40° , ya que no dispuso de datos para alturas superiores a éstas. Todo esto ha sido ya ampliamente comentado en los apartados II.2.1.5 y II.2.1.6, de esta tesis.

Como consecuencia de lo anterior, se van a estudiar correlaciones

con parámetros análogos a K_{do} , K_t para valores instantáneos en función de la altura del sol, que es como tener en cuenta otro parámetro más, que si bien no recoge medidas de turbidez, vapor de agua, etc, porque no se disponen en la actualidad de ellos, si elimina al menos el parámetro masa de aire.

Este tratamiento sólo difiere de las correlaciones tipo Bugler o tipo Iqbal, en que en este apartado utilizamos valores instantáneos en función de la altura del sol, y no valores horarios, aunque también se podría hacer con nuestros datos.

La razón por la que no se emplean valores horarios en función de la altura del sol, se puede comprender a partir de la Fig. V.1, que muestra la variación de la altura del sol en función de la hora solar y de los días Julianos 17,47,75,105,135 y 166, que corresponden a los días 17 de enero, 16 de febrero, 16 de marzo, 15 de abril, 15 de mayo y 15 de junio.

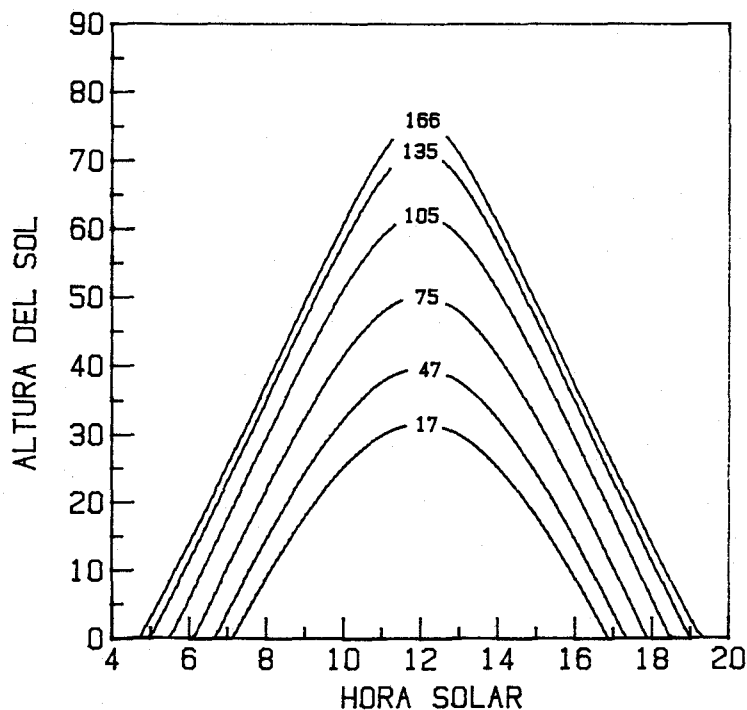


Fig. V.1. Variaciones de la altura del sol en función de la hora solar para varias épocas del año.

Puede observarse en la Fig. V.1 que hay varias épocas del año en las que, en nuestras latitudes, el sol, en una hora, p.e. entre las 8 y 9 hora solar e incluso entre las 9 y 10 hora solar, su altura varía hasta 12° y 14° .

Por este motivo no tiene mucho sentido obtener correlaciones horarias en función de la altura del sol, con datos reales medidos en esas horas, a no ser que busquemos con algoritmos matemáticos cuál es la altura solar media correspondiente a cada hora del día. Esto último siempre es posible hacerlo, ya que teniendo en cuenta cómo varía la altura del sol, a través de la expresión:

$$\sin \alpha = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cos \omega$$

donde L es la latitud, δ la declinación y ω el ángulo horario correspondiente a las horas exactas, podríamos obtener:

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_{\omega_i}^{\omega_i + \pi/12} \arcsin(\sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega) d\omega}{\int_{\omega_i}^{\omega_i + \pi/12} d\omega} \quad (1)$$

donde ω_i y $\omega_i + \pi/12$ son los valores que toma el ángulo horario en los límites de la hora considerada.

Debido a que la integral del numerador en la expresión (1) no se ha encontrado su primitiva, hay que recurrir al cálculo numérico para encontrar las alturas medias deseadas. Este procedimiento es el que sigue J. Marco (41).

Por tanto, emplear la altura del sol como parámetro cuando los valores de radiación empleados corresponden a una hora, introduce serias dificultades e imprecisiones.

Es razonable, sin embargo, que los investigadores que se

dedican a estas tareas, empleen en general valores horarios de radiación suministrados por fuentes oficiales, como por ejemplo, los institutos de meteorología de sus respectivos países, ya que no disponen de otros. Sin embargo, en aras a conocer realmente cómo influye la altura del sol en las correlaciones entre los valores de difusa y global, nosotros hemos dispuesto de valores instantáneos de estas variables, que sí corresponden exactamente a una altura del sol conocida.

V.2.- Base y procesamiento de datos.

Con todos los antecedentes señalados, se han realizado los siguientes pasos:

1. Análisis de los datos almacenados en disco magnético cada cinco minutos de irradiancia global y difusa horizontal para los años 1984, 1985 y 1986.

2. Separación de los datos de irradiancia en ficheros de alturas del sol comprendidos entre cinco y setenta y cinco grados, de cinco en cinco grados. En estos ficheros, llamados genéricamente AL - X - A, siendo AL las iniciales de altura; X la altura de que se trate y A el año de la medida, van grabados los siguientes datos: hora solar correspondiente a la altura estudiada, el día Juliano, la irradiancia global horizontal, la irradiancia difusa horizontal y la irradiancia directa normal, medidas con nuestro sistema descrito en el capítulo III de esta tesis.

Las operaciones indicadas hasta aquí se realizan por medio del programa "CORR-ALTUR".

3. Obtención a partir de un fichero de datos para cada altura del sol, y para todos los años medidos, donde se almacenan los

pares de puntos $Mt = \frac{I_{gh}}{I_{oh}}$ y $Md = \frac{I_{dh}}{I_{oh}}$, siendo I_{oh} la irradiancia extraterrestre calculada para un instante de un día y a una altura correspondiente; I_{gh} e I_{dh} las irradiancias global y difusa horizontal medidas para un instante y a una altura dada.

Esta operación se realiza por medio del programa "OPP", obtención de pares de puntos.

4. A partir de los ficheros de datos anteriores, llamados genéricamente AL - X - MtMd, siendo AL inicial de altura; X la altura correspondiente y MtMd indicativo de los pares de puntos almacenados, se ordenan de menor a mayor los pares de puntos en función de la abscisa Mt. Esto se hace con el programa "ORDENAR". A los ficheros ordenados por altura, les damos el nombre genérico de "ORDENADO-X", siendo X la altura de que se trate.

5. Con la base de datos contenida en los ficheros "ORDENADO-X", se ha hecho un estudio gráfico y analítico para ver cuál es la mejor relación que se puede encontrar entre la irradiancia solar difusa horizontal y la irradiancia solar global horizontal.

V.3.- Relaciones Mt-Md para distintas alturas del sol.

Las Figs. V.2 a V.8 muestran los pares de valores reales $Mt = I_{gh}/I_{oh}$ y $Md = I_{dh}/I_{oh}$, siendo I_{gh} e I_{dh} las irradiancias global y difusa horizontal para una altura dada e I_{oh} la irradiancia extraterrestre horizontal para la misma altura del sol en la que se midió I_{gh} e I_{dh} .

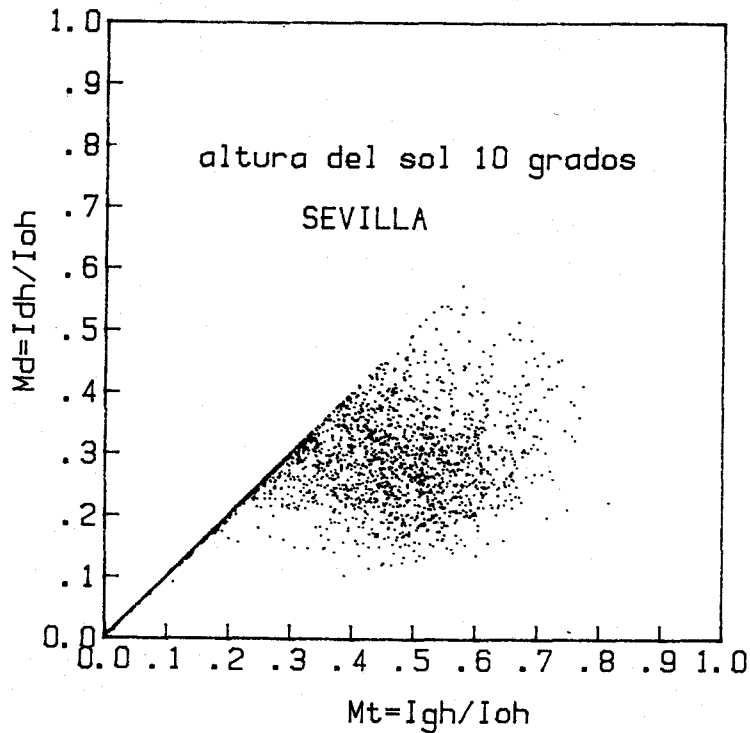


Fig. V.2. Valores Mt, Md obtenidos con medidas de Idh e Igh para alturas del sol de 10 grados.

Se observa en esta Fig. como hasta Mt igual a 0.3 la distribución es rectilínea. A partir de Mt igual a 0.3 existe una fuerte dispersión en torno a un mismo valor de Mt . También se observa, comparada esta Fig. V.2 con la IV.34 del capítulo IV, que representa los valores Kt, Kdo horarios, que a partir de Mt mayor que 0.6, a Md le corresponden valores muy altos. Como vamos a ver en las siguientes figuras, esto sólo ocurre para alturas del sol de 10 grados y algo para 20 grados. Desde 20 grados en adelante, las distribuciones de irradiancia son todas muy parecidas, tendiendo a disminuir el Md conforme aumenta Mt a medida que la altura se hace mayor.

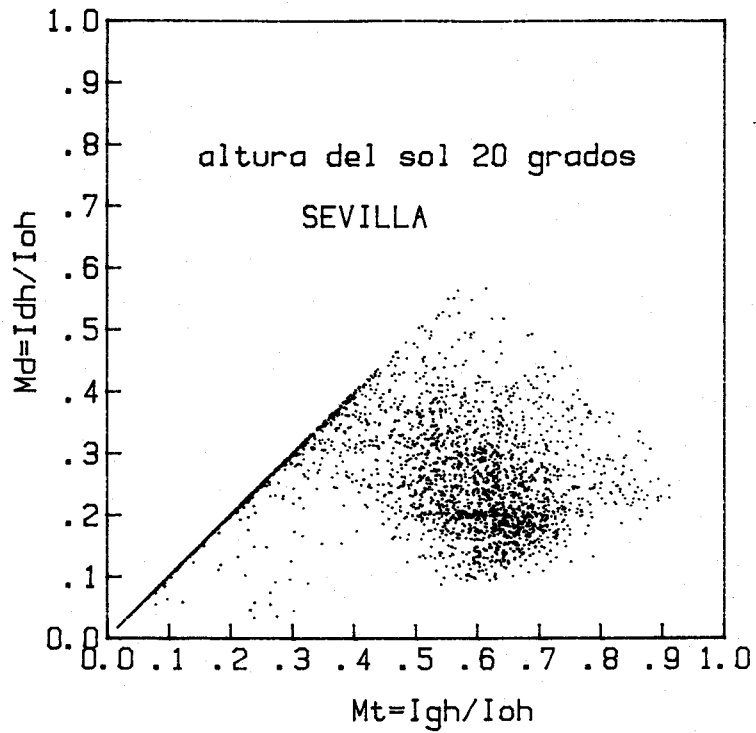


Fig. V.3. Valores M_t , M_d obtenidos con medidas de I_{dh} e I_{gh} para alturas del sol de 20 grados.

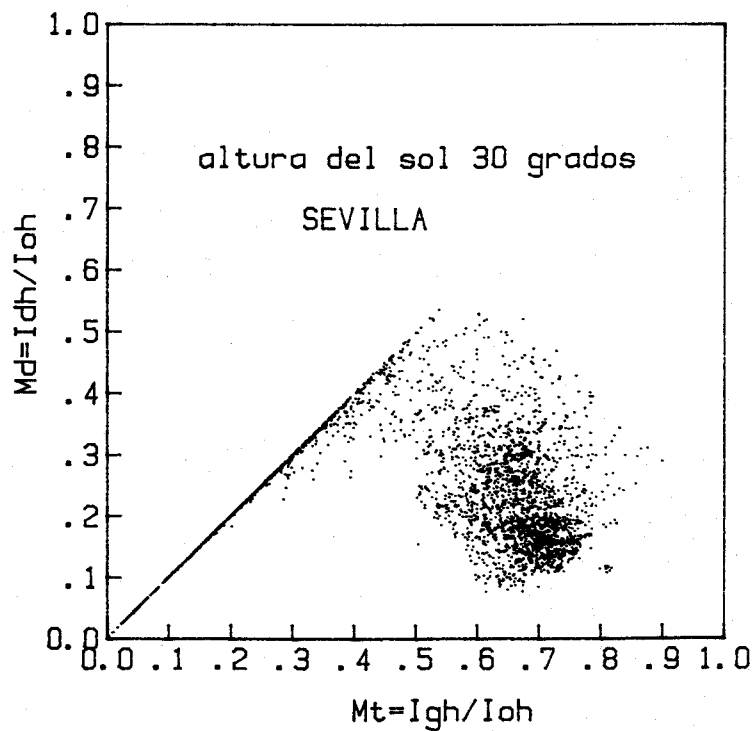


Fig. V.4. Valores de M_t , M_d obtenidos con medidas de I_{dh} e I_{gh} para alturas del sol de 30 grados.

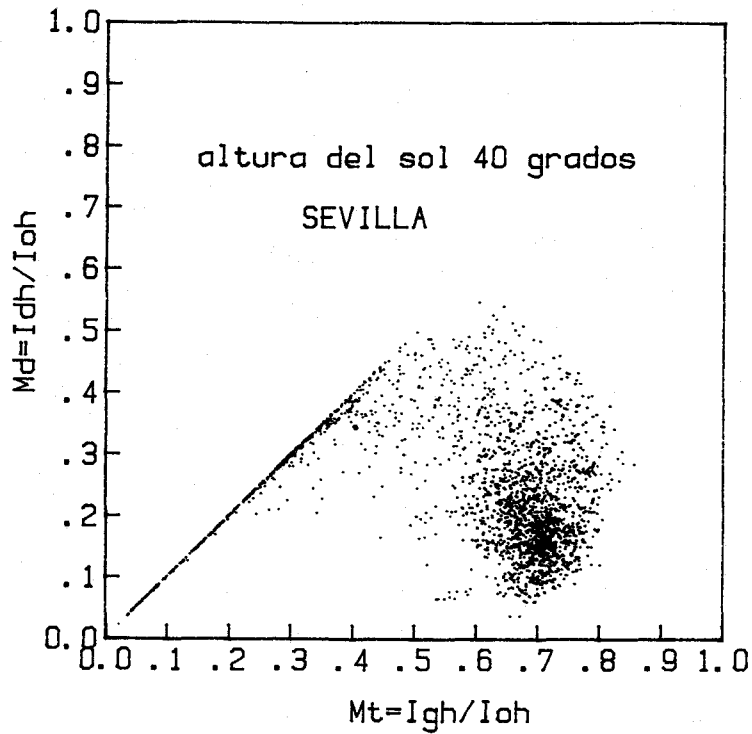


Fig. V.5. Valores Mt , Md obtenidos con medidas de Idh e Igh para alturas del sol de 40 grados.

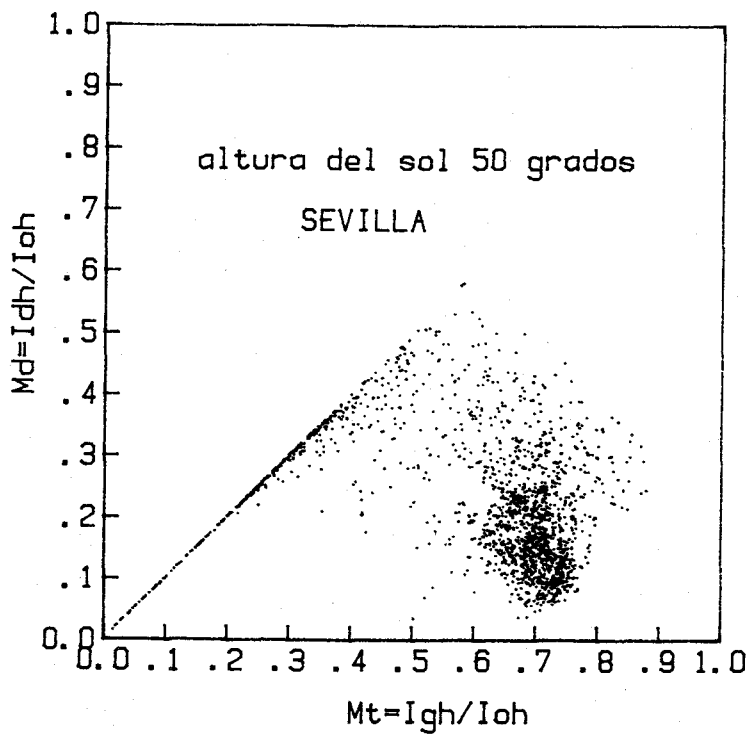


Fig. V.6. Valores Mt , Md obtenidos con medidas de Idh e Igh para alturas del sol de 50 grados.

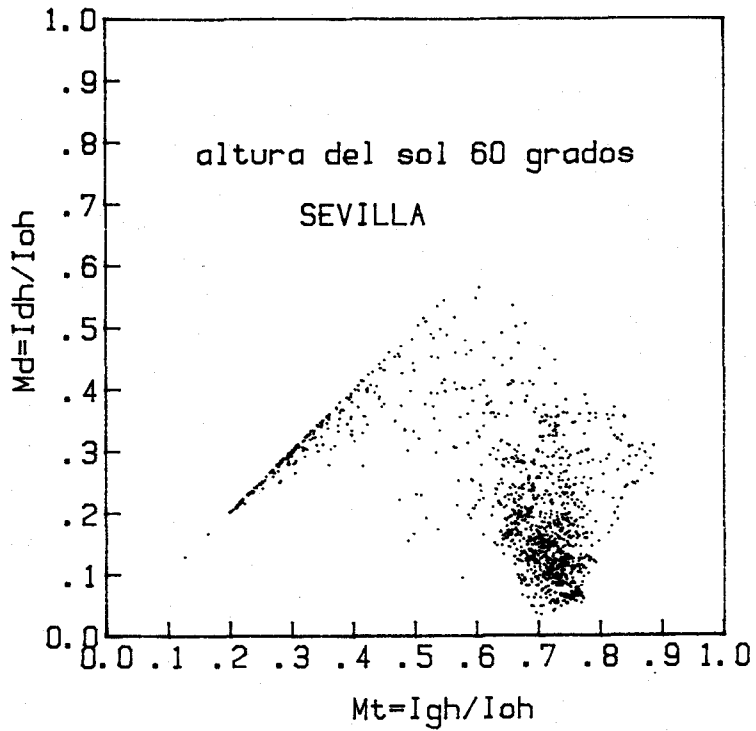


Fig. V.7. Valores Mt , Md obtenidos con medidas de Idh e Igh para alturas del sol de 60 grados.

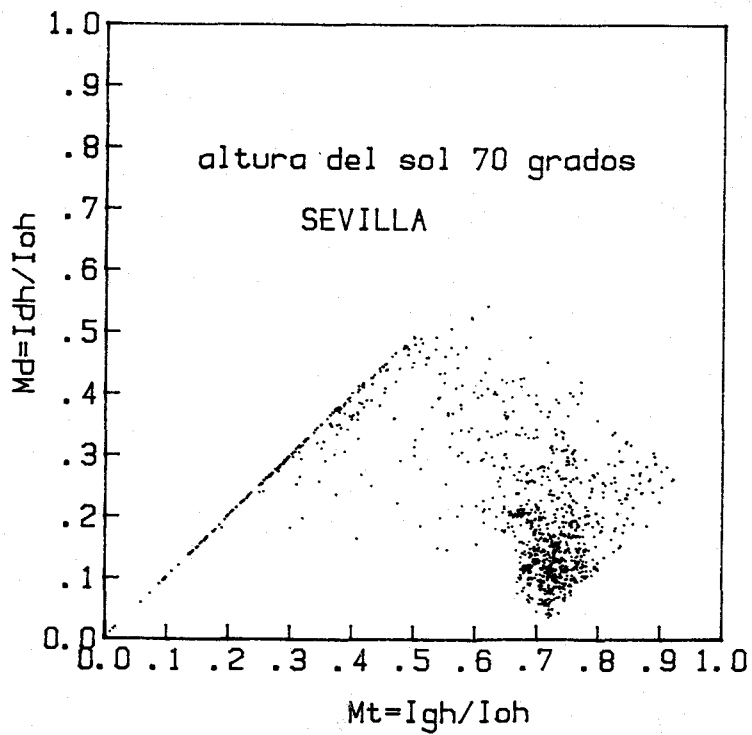


Fig. V.8. Valores Mt , Md obtenidos con medidas de Idh e Igh para alturas del sol de 70 grados.

V.4.- Resultados de las relaciones Mt-Md.

A la vista de la distribución de los pares experimentales Mt, Md en función de la altura del sol, parece evidente que en todas las alturas, hasta un valor de Mt que está comprendido entre 0.3 y 0.4, la distribución Mt, Md es rectilínea. Un intento de ajuste a los puntos reales a partir de Mt superior a 0.4 carece de sentido. La nube de puntos que se observa en todos los casos puede tener una doble interpretación:

1) Que los pares Mt, Md estén relacionados, pero que se necesiten más variables o parámetros físicos para explicar correctamente esta correlación multivariante que se podría dar.

2) Que los pares Mt, Md no estén relacionados entre sí.

Por supuesto que nos inclinamos por la opción 1. Es indudable que existe una relación entre estos parámetros Mt, Md, que es lo mismo que decir, existe una relación entre la radiación global y difusa. Además, para explicar la dispersión de valores Md en torno a un mismo Mt, sí que harían falta medidas simultáneas de otros parámetros físicos, como ya hemos citado. Pero debido a que no se tienen registros de ellos, junto con las medidas de radiación, hemos optado en este capítulo V por encontrar una relación entre los valores de Mt y los valores medios de Md correspondientes a una banda de Mt.

Con la misma técnica, explicada en el capítulo IV, de ajuste de pares de valores a una serie de Fourier salvo para la altura de 10^2 , se han obtenido los siguientes resultados:

V.4.1.- Relación Mt, Md para la altura de 10 grados.

En todas las alturas, excepto en la de 10 grados, un ajuste de Fourier con dos armónicos ha conducido a resultados óptimos. El proceso consiste en dividir el eje de abscisas Mt en intervalos de 0.025. Dentro de cada banda de Mt, el par Mt, Md se le ha asignado a la mitad de la banda para Mt y a la media aritmética por banda para Md.

Sin embargo, para la altura de 10°, era preferible ajustar a una ecuación polinómica a la vista de la forma de la distribución, aunque se intentó sin éxito un ajuste de Fourier.

En la Fig. V.9 pueden verse los puntos experimentados y el ajuste obtenido. Este responde a la siguiente ecuación:

$$Md = 0.965 Mt (1 - D) + D (1.09 Mt + 0.63 Mt^2 - 5.85 Mt^3 + 5.29 Mt^4)$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad Mt \leq 0.25$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad Mt > 0.25$$

El coeficiente de determinación del ajuste ha sido $r^2 = 0.95$, el error RMSE = 1.6×10^{-2} y el error MAE 0.01.

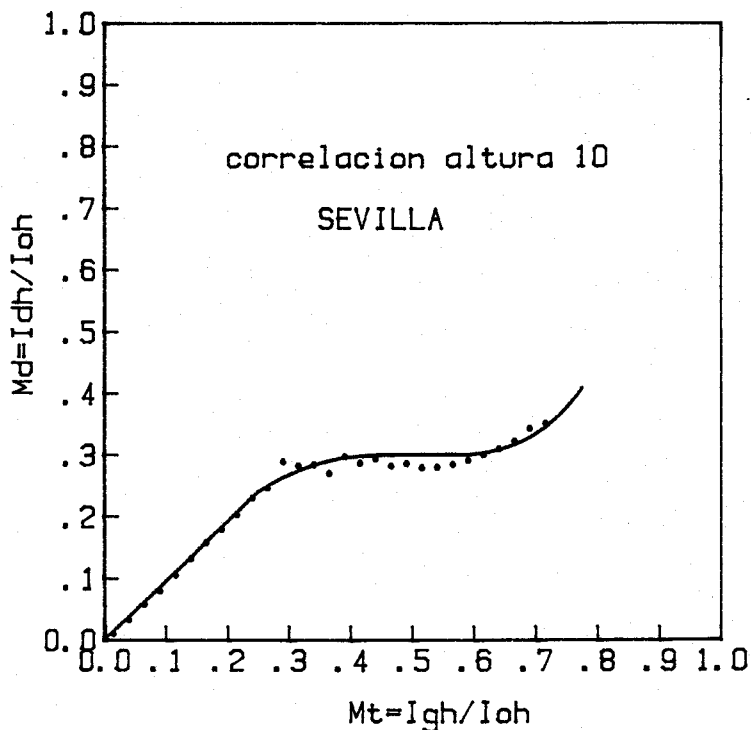


Fig. V.9. Variación de la irradiancia difusa para 10°.

Se observa en esta figura cómo hasta Mt igual a 0.3 la distribución es rectilínea y para Mt mayor que 0.3, Md se mantiene casi constante al variar Mt , tendiendo Md a aumentar ligeramente a partir de Mt igual a 0.6.

V.4.2.- Relación Mt , Md para la altura de 20 grados.

En la Fig. V.10 se observan los puntos a los que se les ha aplicado el ajuste de Fourier. En este caso, el ajuste se ha hecho entre los valores de Mt comprendidos entre 0.3 y 0.875, como consecuencia de imponer la condición de que el coeficiente de determinación R^2 sea mínimo.

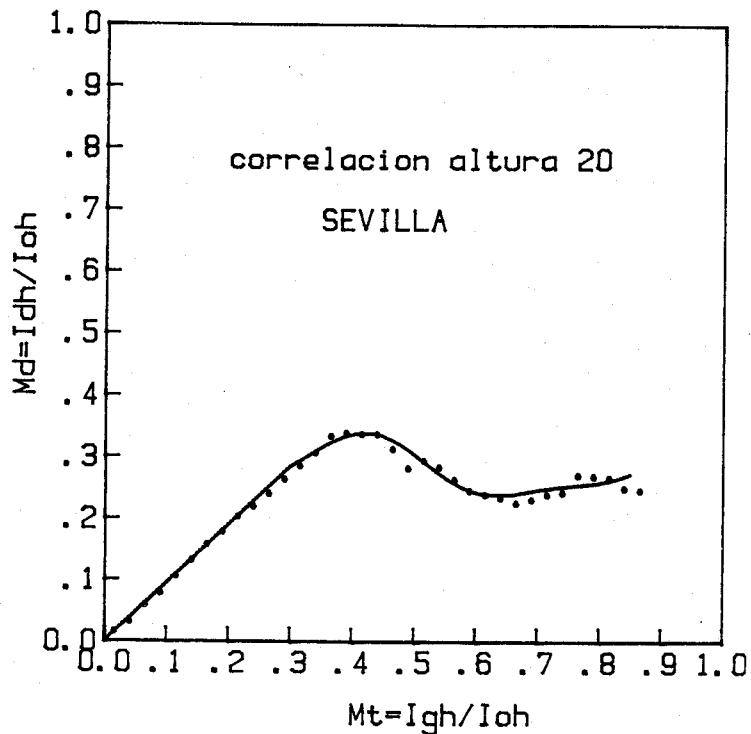


Fig. V.10. Variación de la irradiancia difusa para 20°.

El resultado del ajuste ha conducido a la relación:

$$M_d = (1 - D) 0.95 M_t + D (0.28 + 0.046 \cos (626 M_t - 253) + 0.0145 \cdot \cos (2 \times 626 M_t - 180))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad M_t \leq 0.3$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad M_t > 0.3$$

El coeficiente de determinación ha sido 0.88, el error RMSE, 0.012 y el error MAE 9.9×10^{-3} .

Se observa en la Fig. V.10. como existe un máximo de M_d para M_t próximo a 0.4, produciéndose un descenso y un ligero aumento conforme M_t aumenta, pero la curva tiende a mantener un valor de M_d casi constante a partir de M_t igual a 0.55.

Un sólo armónico hace que el coeficiente de determinación sea igual a 0.80, empeorando el ajuste significativamente.

V.4.3.- Relación Mt, Md para la altura de 30 grados.

En la Fig. V.11 se muestran los valores a los que se les ha aplicado el ajuste.

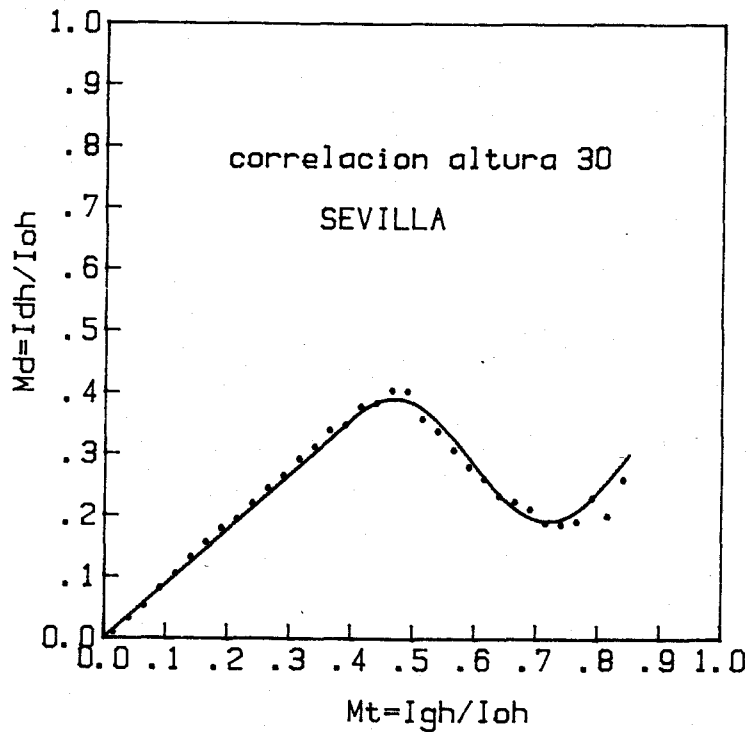


Fig. V.11. Variación de la irradiancia difusa para 30°.

Los valores de M_t ajustados oscilan entre 0.4 y 0.9.

El resultado del ajuste ha sido:

$$M_d = 0.89 M_t (1 - D) + D (0.291 + 0.1 \cos (720 M_t - 337)).$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad M_t \leq 0.4$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad M_t > 0.4$$

El coeficiente de determinación ha sido 0.956, el error RMSE 0.015 y el MAE vale 0.01.

Se observa en la Fig. V.11 como hay un máximo de M_d que corresponde a un valor de M_t comprendido entre 0.45 y 0.5. A partir de M_t igual a 0.5, la irradiancia difusa disminuye, pasando M_d por un mínimo que corresponde a un valor de M_t de 0.72, volviendo de nuevo M_d a aumentar. Como vamos a ver a continuación y para todas las alturas del sol superiores a los 30 grados, siempre va a existir un máximo y un mínimo bien definido para la irradiancia difusa en función de la irradiancia global horizontal.

V.4.4.- Relación M_t , M_d para la altura de 40 grados.

En la Fig. V.12 se observan los pares de valores obtenidos. Los valores de M_t ajustados oscilan entre 0.3 y 0.8.

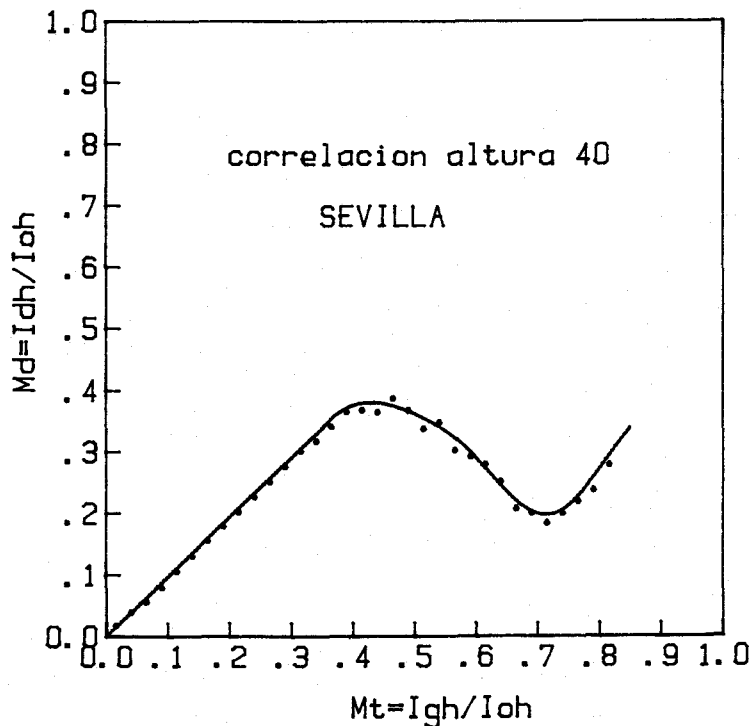


Fig. V.12. Variación de la irradiancia difusa para 40°.

El resultado del ajuste ha sido:

$$M_d = 0.97 M_t (1 - D) + D (0.3 + 0.09 \cos (720 M_t - 326) + \\ + 0.0145 \cos (2 \times 720 M_t - 149))$$

en donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad M_t \leq 0.36$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad M_t > 0.36$$

El coeficiente de determinación ha sido 0.978, el error - RMSE 9.15×10^{-3} y el error MAE 7.9×10^{-3} . Se observa en esta Fig, al igual que en la Fig. V.11, que existe un máximo y un mínimo - bien definido para la irradiancia difusa.

El máximo se da para un valor de M_t que oscila entre 0.4 y 0.45 y el mínimo de M_d se da para un valor de M_t que oscila entre 0.7 y 0.72. Comparando las Figs. V.11 y V.12, vemos que el mínimo de M_d se consigue para el mismo valor de M_t , aunque el máximo de M_d está ligeramente desplazado hacia valores decrecientes de M_t para 40 grados, es decir, cae entre 0.4 y 0.45, mientras que para 30 grados el máximo cae entre 0.45 y 0.50. Por lo demás, las curvas guardan una gran semejanza.

V.4.5.- Relación M_t , M_d para la altura de 50 grados.

En este caso, los puntos ajustados para conseguir el mejor ajuste, es decir, el máximo valor del coeficiente de determinación, han oscilado entre 0.3 y 0.875. Estos valores y el ajuste, se observan en la Fig. V.13.

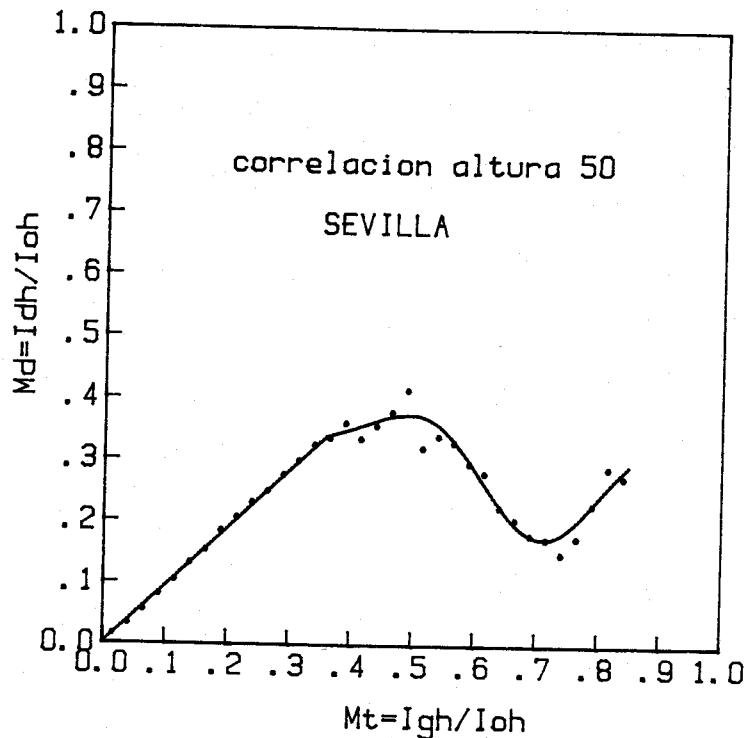


Fig. V.13. Variación de la irradiancia difusa para 50°.

El resultado del ajuste ha conducido a la ecuación:

$$Md = 0.94 Mt (1 - D) + D (0.29 + 0.94 \cos (626 Mt - 275) + \\ + 0.025 \cos (2 \times 626 Mt - 332))$$

$$\text{donde } D = 0 \quad \text{si} \quad Mt \leq 0.36$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad Mt > 0.36$$

El coeficiente de determinación ha sido 0.92, el error RMSE 1.95×10^{-2} y el error MAE 0.013. Se observa en la Fig. V.13, como el máximo de Md lo consigue para valores de Mt comprendidos entre 0.45 y 0.5 y el mínimo para valores que oscilan entre 0.7 y 0.72. De nuevo, el mínimo coincide en las alturas de 30, 40 y 50 grados que llevamos analizados. El máximo podemos afirmar que está situado entre 0.4 y 0.5 de Mt para las tres alturas. De nuevo, y al igual que sucede en las alturas anteriores, para Mt mayor a 0.72 empieza a aumentar el valor de la irradiancia difusa.

V.4.6.- Relación Mt, Md para la altura de 60 grados.

Para la altura de 60 grados, los puntos ajustado oscilan entre 0.25 y 0.85.

La Fig. V.14 muestra los valores ajustados y el ajuste obtenido.

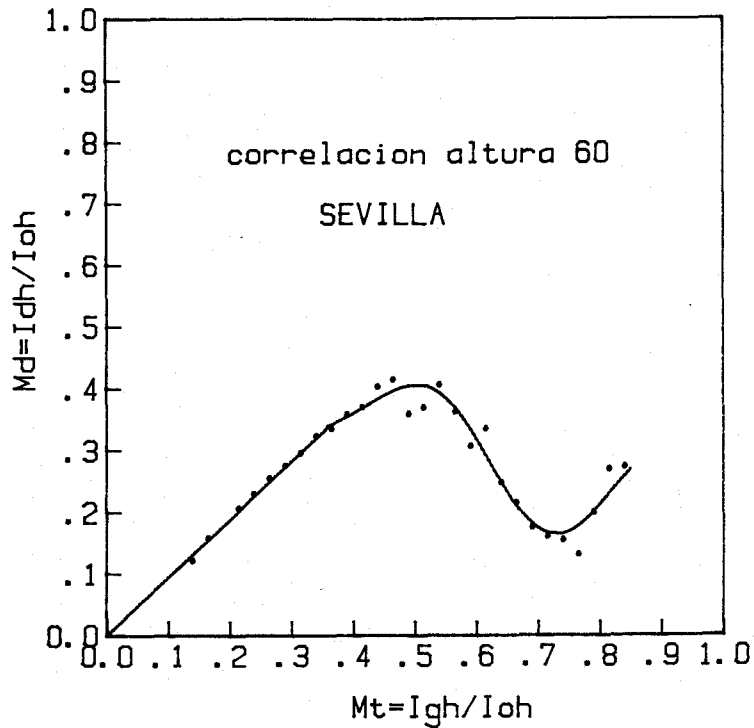


Fig. V.14. Variación de la irradiancia difusa para 60°.

La ecuación obtenida ha sido:

$$Md = (1 - D) 0.94 Mt + D (0.297 + 0.11 \cos(600 Mt - 272) + 0.03 \cos(2 \times 600 Mt - 306))$$

donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad Mt \leq 0.35$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad Mt > 0.35$$

El coeficiente de determinación ha sido 0.92, el error RMSE 0.022 y el MAE 1.76×10^{-2} .

Una vez más se observa como el valor mínimo de la irradian

cia difusa se da para un valor de M_t que oscila entre 0.7 y 0.72, consiguiéndose el máximo de M_d para valores de M_t que oscilan al rededor de 0.5.

V.4.7.- Relación M_t , M_d para la altura de 70 grados.

Para la altura de 70 grados, los valores ajustados de M_t , oscilan entre 0.25 y 0.90. En la Fig. V.15 pueden observarse los puntos ajustados y el ajuste obtenido.

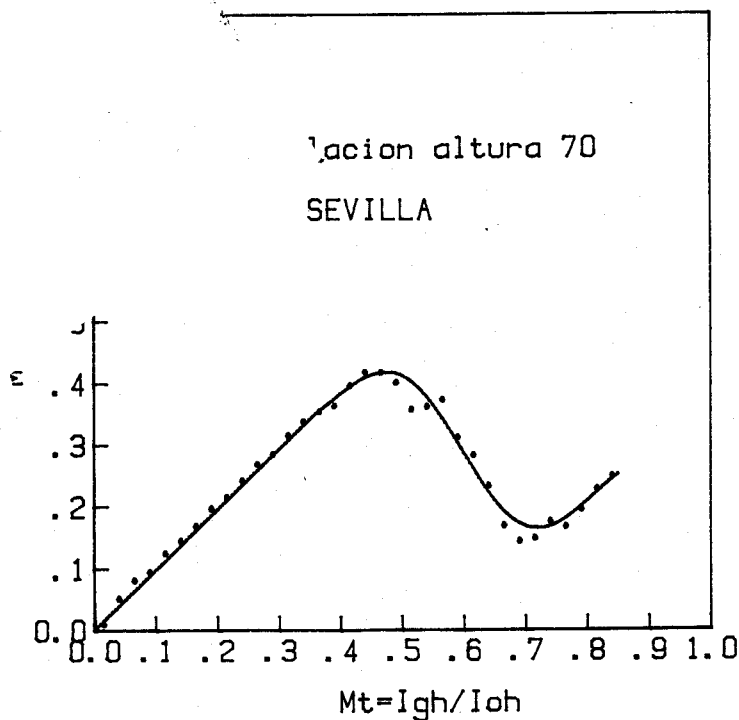


Fig. V.15. Variación de la irradiancia difusa para 70°.

El resultado del ajuste ha sido:

$$M_d = 0.98 M_t (1 - D) + D (0.294 + 0.115 \cos (554 M_t - 239) + 0.030 \cos (2 \times 554 M_t - 214))$$

donde

$$D = 0 \quad \text{si} \quad M_t \leq 0.36$$

$$D = 1 \quad \text{si} \quad M_t > 0.36$$

El coeficiente de determinación ha sido de 0.96, el error RMSE vale 1.57×10^{-2} y el MAE 1.29×10^{-2} .

Al igual que para las alturas de 30°, 40°, 50° y 60°, en esta ocasión el mínimo valor de la irradiancia difusa se obtiene para valores de M_t comprendidos entre 0.7 y 0.72. El máximo oscila entre 0.45 y 0.50, también como ocurrió para las alturas de 30 y 50 grados, ya que para 40 grados el máximo se obtenía mas bien para M_t igual a 0.40 y para 60 grados el máximo de M_d se obtenía próximo a M_t igual a 0.5.

En cualquier caso, los valores máximos de irradiancia difusa se obtienen para valores de M_t comprendidos entre 0.4 y 0.5, mientras que el mínimo de M_d se obtiene para M_t comprendidos entre 0.7 y 0.72.

V.5.- Comparación entre las distribuciones horarias e instantáneas en función de la altura del sol.

Una comparación entre las distribuciones horarias de I_{qbal} y las distribuciones instantáneas en función de la altura pueden observarse en las Figs. V.16 y V.17.

Simultáneamente en las Tablas V.1 y V.2 se muestran los valores máximos y mínimos para cada tipo de distribución, en función de la altura.

TABLA V.1. Valores máximo y mínimo de Md obtenidos con las distribuciones de Sevilla en función de la altura.

ALTURA	MAXIMOS		MINIMOS	
	Mt	Md	Mt	Md
20º	.42,	<u>.35</u>	.62,	<u>.25</u>
30º	.47,	<u>.39</u>	.72,	<u>.19</u>
40º	.42,	<u>.39</u>	.71,	<u>.2</u>
50º	.5,	<u>.38</u>	.71,	<u>.18</u>
60º	.5,	<u>.41</u>	.72,	<u>.16</u>
70º	.48,	<u>.42</u>	.72,	<u>.16</u>

TABLA V.2. Valores máximos y mínimos de Kdo obtenida con las distribuciones de Iqbal en función de la altura.

ALTURA	MAXIMOS		MINIMOS	
	Kt	Kdo	Kt	Kdo
20º	.42,	<u>.32</u>	.75,	.20
30º	.44,	<u>.34</u>	.75,	<u>.18</u>
40º	.46,	<u>.36</u>	.78,	<u>.16</u>

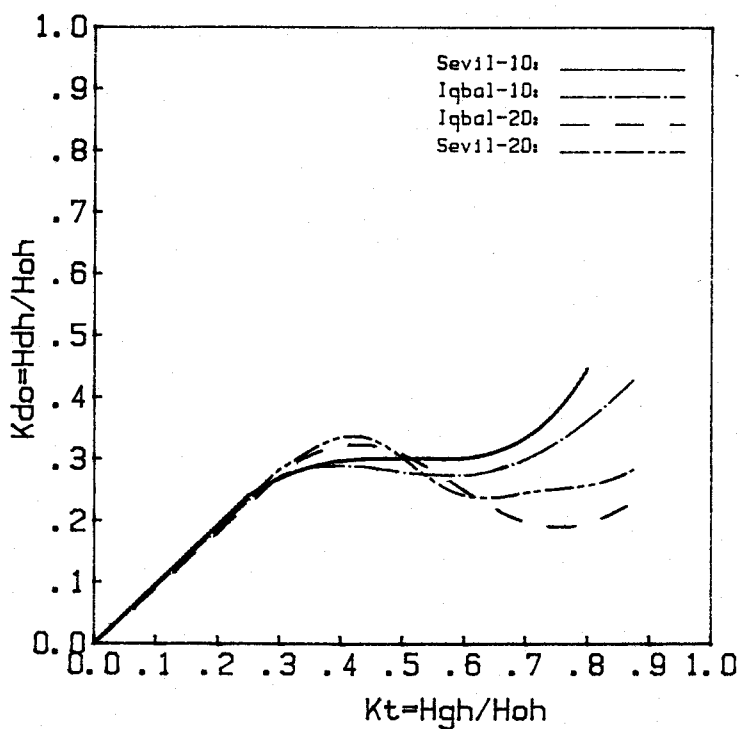


Fig. V.16. Comparación entre las correlaciones horarias e instantáneas para 10° y 20°.

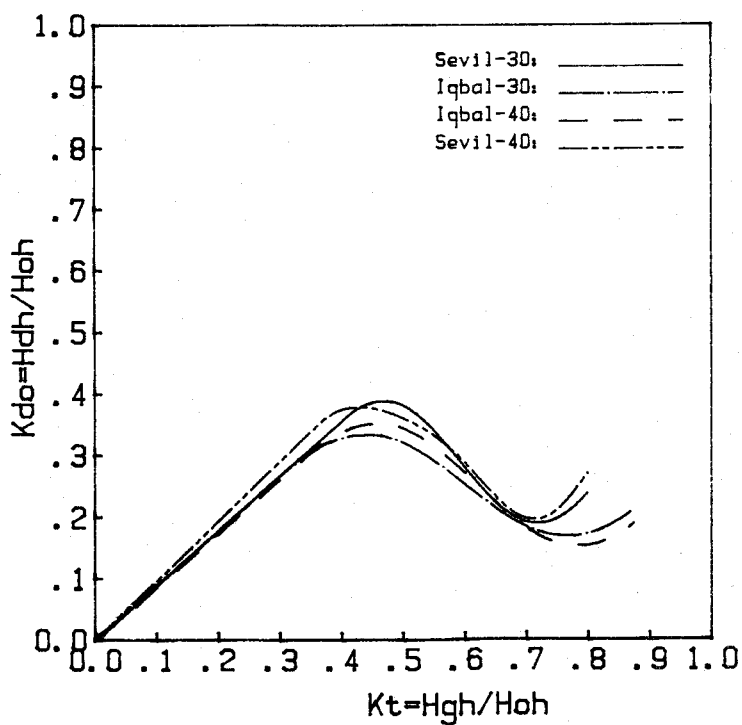


Fig. V.17. Comparación entre las correlaciones horarias e instantáneas para 30° y 40°.

De un estudio comparativo de los resultados de las Tablas V.1 y V.2 y de las gráficas de las Figs. V.16 y V.17, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1º. El valor máximo de la irradiancia y de la irradiación horaria, en general, aumentan con la altura y se desplazan hacia la derecha, esto es, hacia valores crecientes de la radiación global.
- 2º. El valor mínimo de la irradiancia y de la irradiación horaria, en general, tiende a disminuir con la altura. Estos valores mínimos se dan para un valor fijo de K_t en los casos de la distribución de irradiancia difusa y sufren un ligero - desplazamiento de K_t para las distribuciones horarias de I_{qbal} .
- 3º. Los valores máximos de la irradiancia y de la irradiación horaria suelen ser, en todos los casos donde se pueden comparar las alturas, superiores que en las distribuciones horarias, como puede observarse en las Figs. V.16 y V.17.
- 4º. Los valores mínimos de la irradiancia y de la irradiación horaria, aunque se encuentran desplazadas en ambas distribuciones, si son valores muy próximos.
- 5º. Para la altura de 10° se observa una forma semejante tanto para las distribuciones de irradiancia como de irradiación, aunque los valores de la irradiancia difusa suelen ser superior en todos los casos a los de irradiación horaria.

CAPITULO VI.

ESTUDIO DE DISTRIBUCIONES DE IRRADIANCIA SOLAR
DIFUSA CORRESPONDIENTES A UN MISMO VALOR DE LA
IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL, PARA CIELOS CLAROS

CAPITULO VI

ESTUDIO DE DISTRIBUCIONES DE IRRADIANCIA SOLAR
DIFUSA CORRESPONDIENTES A UN MISMO VALOR DE LA
IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL, PARA CIELOS CLAROS.VI.1.- Introducción.

Hasta ahora, las distribuciones de irradiancia difusa a partir de la irradiancia global horizontal en función de la altura solar, se han resuelto por un procedimiento de ajuste de Fourier a los pares de puntos, cuya obtención se describe en el apartado V.4.1.

Es evidente que un ajuste directo a los puntos experimentales de cualquiera de las Figs. V.2 a V.8, por muy buena que fuera la técnica matemática de ajuste, no hubiese dado un resultado aceptable, dada la fuerte dispersión de valores de irradiancia difusa en torno a un mismo valor de irradiancia global.

Este hecho, puesto ya de manifiesto por otros investigadores (42), nos ha llevado a hacer un análisis de cuál es la causa por la que se produce esta fuerte dispersión de valores de M_d para idénticos valores de M_t , y qué soluciones se pueden aportar para acotar el problema, que proporciona un mayor conocimiento del mismo al establecerse cuáles son los márgenes de probabilidad con la que se puede obtener la irradiancia difusa para un determinado valor de irradiancia global. Este hecho permitirá, entre otras cosas, determinar el valor más probable así como suavizar el camino para modelizaciones y procesos de simulación, al darse las funciones densidad de distribución para una determinada banda de irradiancia global. Creemos que esta visión del problema, generalizable a procesos similares de radiación, abre nuevas perspectivas de investigación

en este campo.

VI.2.- Origen de la dispersión de la irradiancia solar difusa correspondiente a un mismo valor de la irradiancia global horizontal para cielos claros.

En base a los estudios realizados por diferentes investigadores (40) y (43 a 50), se puede explicar porqué a un mismo valor de la irradiancia global solar horizontal le pueden corresponder distintos valores de la irradiancia difusa horizontal. Aquí vamos a hacer una síntesis de la influencia de los parámetros atmosféricos sobre los distintos componentes de la radiación solar para poder explicar el fenómeno mencionado. Las Figs. de este apartado están tomadas de Iqbal (40).

VI.2.1.- Variación de la irradiancia difusa con los parámetros atmosféricos.

Los parámetros que más influencia tienen sobre la variación de la irradiancia difusa de un modo general son: la masa de aire, los parámetros de turbidez β y α y el albedo de la superficie de la Tierra.

Un aumento de la masa de aire da lugar a una atenuación de la irradiancia difusa. La Fig. VI.1 pone de manifiesto este hecho para la difusión tipo Rayleigh. Se observa en ella que un incremento de $m = 1$ a $m = 2$, disminuye considerablemente la irradiancia difusa espectral. La zona sombreada de negro representa los efectos de la absorción molecular cuando se produce un aumento del contenido de ozono de 0 a 0,35 cm en condiciones normales de temperatura y presión (NTP) y un incremento del vapor de agua de 0 a 2 cm. Este efecto se hace particularmente más intenso en la zona del espectro ultravioleta y parte del visible.

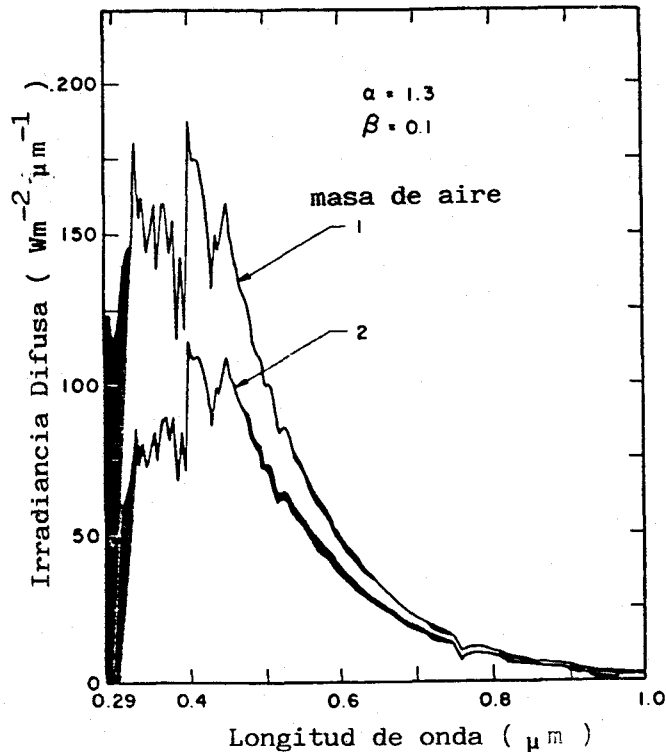


Fig. VI.1. Efecto de la masa de aire sobre la irradiancia difusa considerando una dispersión tipo Rayleigh.

Por otra parte, la Fig. VI.2 representa los efectos de la masa de aire sobre la irradiancia difusa considerando los efectos de dispersión por aerosoles, supuesto que no hay absorción. El efecto de los absorbentes moleculares es pequeño y viene representado por las áreas sombreadas que representan la atenuación debida al aumento de ozono de 0 a 0,35 cm (NTP) y el aumento de vapor de agua de 0 a 2 cm. Observamos en esta figura que la absorción por aerosoles tiene lugar en longitudes de ondas mayores que la dispersión tipo Rayleigh, debida a las moléculas de aire.

A consecuencia de que los aerosoles producen una gran difusión hacia adelante, según se puede explicar en la teoría de Mie, una parte importante de la radiación difusa parece provenir de una pequeña área alrededor del disco solar. Esta radiación se llama radiación circunsolar o aureola solar.

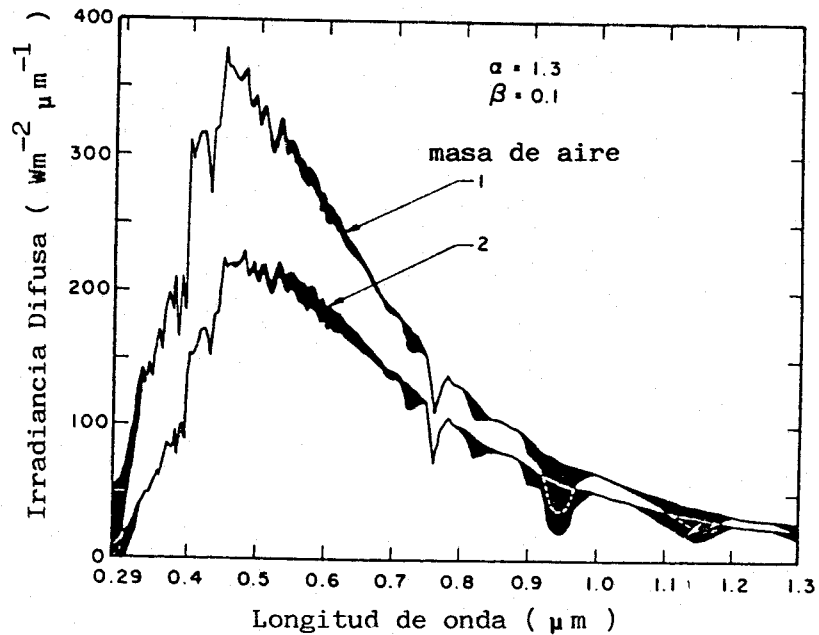


Fig. VI.2. Efecto de la masa de aire sobre la irradiancia difusa considerando la atenuación por aerosoles.

En resumen, cuando la masa de aire crece, el efecto sobre el ultravioleta y el visible es más acusado, existiendo una mayor absorción de la radiación, por tanto una menor transmisividad de la atmósfera, sobre todo en estas longitudes de ondas, no influyendo tanto en el infrarrojo, siendo ésta la causa de que para pequeñas elevaciones del sol, el sol se vea más bien rojizo. Por otro lado, de forma general, disminuye la radiación difusa al aumentar la masa de aire.

La Fig. VI.3 muestra el efecto sobre la irradiancia difusa producido por la variación del parámetro de turbidez de Angström relacionado con la cantidad de aerosoles por unidad de volumen que existe en la atmósfera en dirección vertical.

En esta figura se observa que manteniendo constante la masa de aire, el aumentar β , aumenta la irradiancia difusa claramente. De otro lado, la Fig. VI.4 muestra como varía la irradiancia difusa al variar el otro parámetro de turbidez de Angström α , que da una medida de la proporción de aerosoles de gran tamaño en relación a los de pequeño tamaño. Este índice varía entre 0 y 4. Toma el valor 4, cuando los aerosoles muy pequeños abundan sobre los grandes. En este caso se da una dispersión tipo Rayleigh. Si α es pequeño, por ejemplo 0.5, indica que existe una gran proporción de aerosoles de gran tamaño en relación a los pequeños. En la Fig. VI.4 se observa que al aumentar α , aumenta la irradiancia difusa. Es decir, si los aerosoles presentes en la atmósfera son pequeños, α es mayor, por consiguiente aumenta el proceso de difusión.

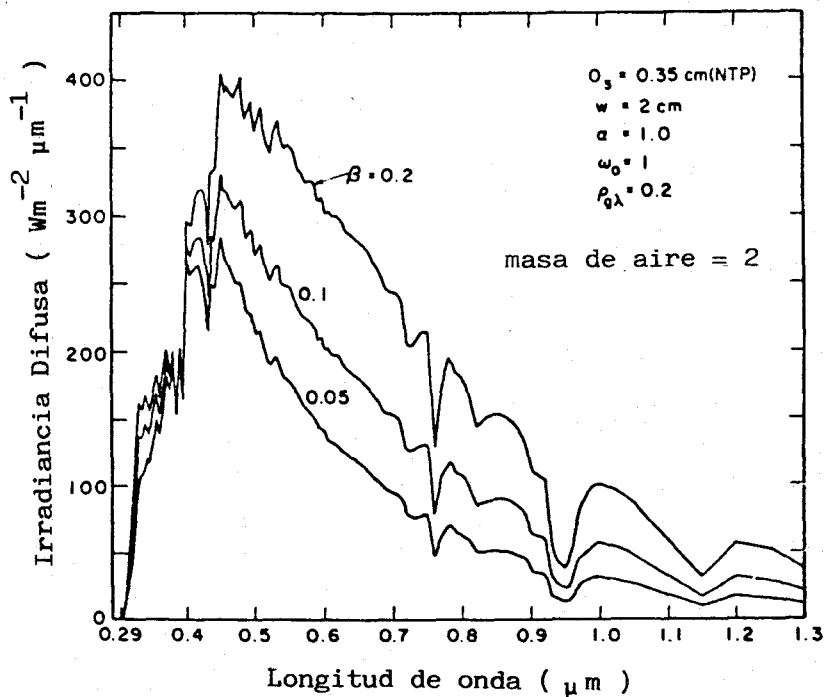


Fig. VI.3. Variación de la irradiancia difusa espectral con el parámetro de turbidez β .

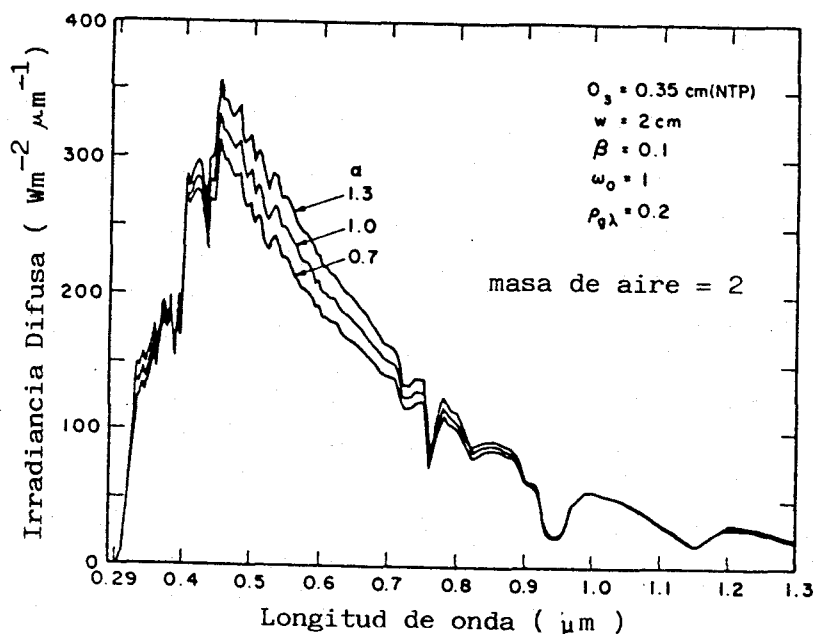


Fig. VI.4. Variación de la irradiancia difusa espectral con el parámetro de turbidez α .

En resumen, un aumento de los parámetros β y α dan lugar a un aumento de la irradiancia difusa, aunque la influencia sobre la difusa de la variación de α es más tenue que la producida por la variación de β . A todo esto, hay que añadir que β y α pueden variar a lo largo de un día, de una hora a otra, simplemente debido a un cambio de temperatura. Se sabe que un aumento de la temperatura, origina una evaporación y condensación de agua en la atmósfera, pudiendo provocar una condensación sobre los aerosoles y partículas constituyentes del medio, haciendo que éstos se hagan de mayor tamaño, pudiendo pasar en este caso, una dispersión tipo Rayleigh a una tipo Mie, al haber aumentado el tamaño de los aerosoles.

Por último, la influencia de la variación del albedo sobre la irradiancia difusa es tal que un aumento del albedo

de 0.2 a 0.7 produce un aumento de la difusa en todo el espectro de longitud de onda, aunque es mayor este aumento en el visible.

La Fig. VI.5 muestra la variación de la irradiancia difusa al aumentar el albedo.

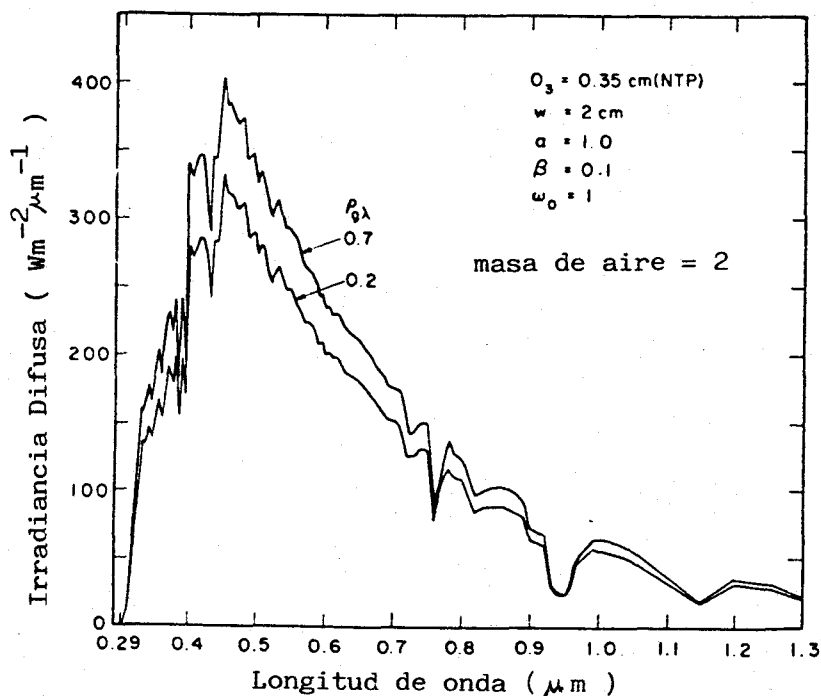


Fig. VI.5. Variación de la irradiancia difusa espectral al aumentar el albedo.

VI.2.2.- Variación de la irradiancia directa con los parámetros atmosféricos.

La Fig. VI.6 muestra la influencia de la masa de aire sobre la irradiancia directa normal. Se observa en ella, que un aumento de ésta provoca un debilitamiento de la directa, más acusado en la zona del ultravioleta y del visible que en el infrarrojo, causa de que el sol se vea rojo está próximo al horizonte.

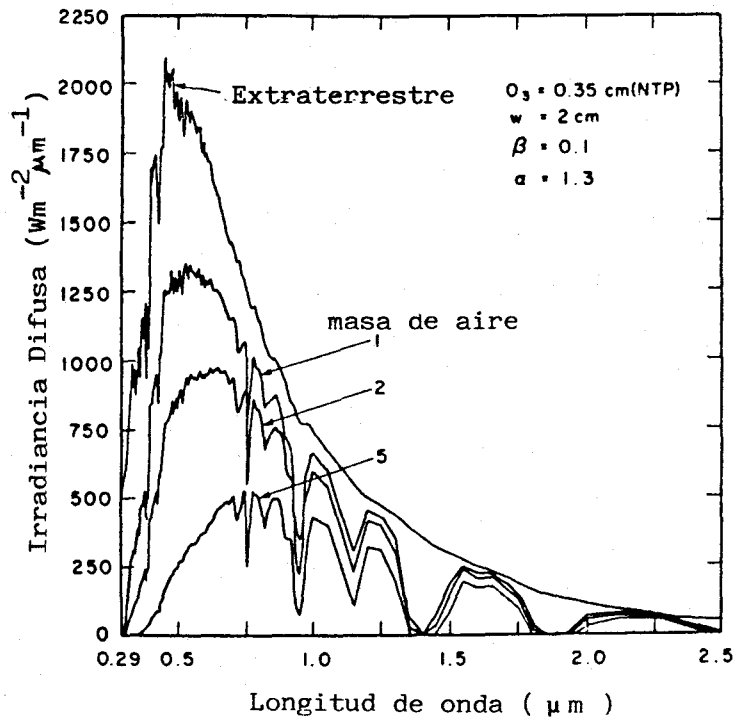


Fig. VI.6. Variación de la irradiancia directa normal espectral - con la masa de aire.

Los efectos de los parámetros de turbidez β y α pueden verse en las Figs. VI.7 y VI.8 respectivamente. De la Fig. VI.7 puede observarse que un aumento de β , provoca una disminución de la irradiancia directa, justamente al contrario de lo que ocurría con la irradiancia difusa. De otro lado, de la Fig. VI.8, un aumento de α no provoca una disminución significativa de la directa, tan sólo una ligera disminución de directa en la zona del espectro ultravioleta y visible.

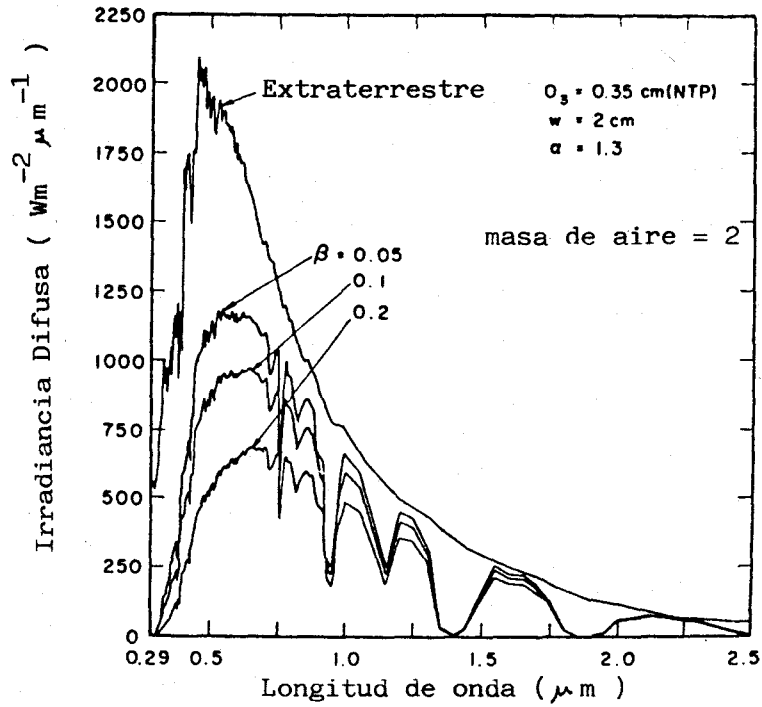


Fig. VI.7. Variación de la irradiancia directa normal espectral con el parámetro β .

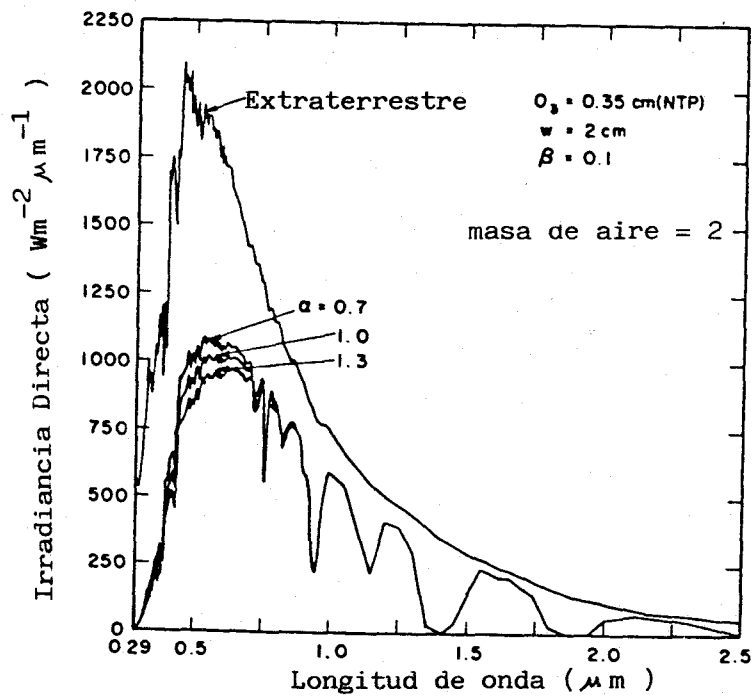


Fig. VI.8. Variación de la irradiancia directa normal espectral con el parámetro α .

VI.2.3. Variación de la irradiancia global horizontal con los parámetros atmosféricos.

La irradiancia global horizontal, la consideramos como la suma de la irradiancia difusa horizontal y la irradiancia directa multiplicada por el seno de la altura del sol o el coseno del ángulo zenital, esto es:

$$I_{gh} = I_{dh} + I_D \cos \theta_z$$

El efecto de los parámetros físicos considerados hasta ahora sobre la global, es la suma de los efectos sobre cada una de sus componentes. Así, el efecto de β sobre la global, da lugar a una ligera disminución de la irradiancia global, porque por un lado, al aumentar β , aumenta la irradiancia difusa, Fig. VI.3, pero sin embargo disminuye la irradiancia directa, Fig. VI.7, por lo que el efecto neto sobre la global es una ligera disminución de global, ya que existe globalmente una compensación entre el aumento de difusa y la disminución de directa simultáneamente al aumentar β . Esto puede verse en la Fig. VI.9.

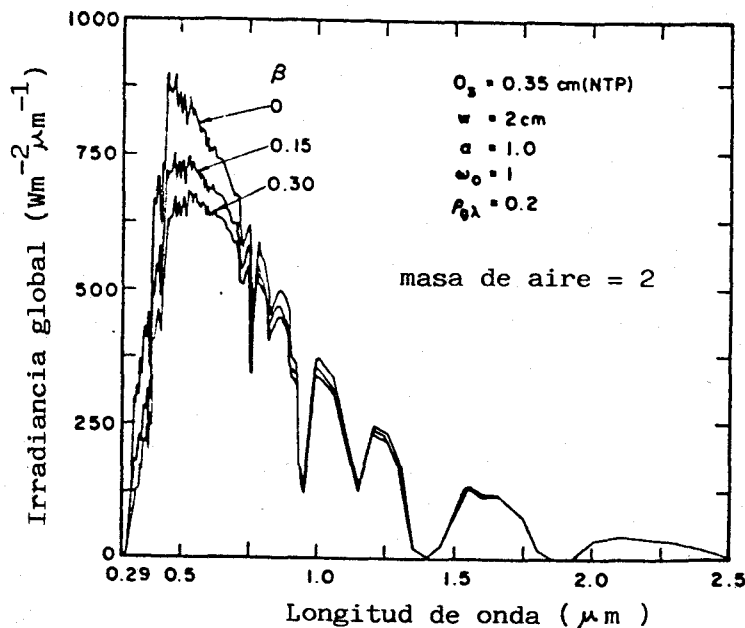


Fig. VI.9. Variación de la irradiancia global espectral con el parámetro de turbidez.

Además, el efecto de un cambio de β sobre la irradiancia global, es mínimo cuando el sol está en posición zenital y va aumentando al aumentar la masa de aire.

De otro lado, las variaciones del parámetro α , no causan una variación a la irradiancia global, que permanece casi insensible a los cambios de α . En todo caso, hay ligeras variaciones de global en la zona del espectro ultravioleta y algo en la zona del visible. La Fig. VI.10, pone de manifiesto este hecho.

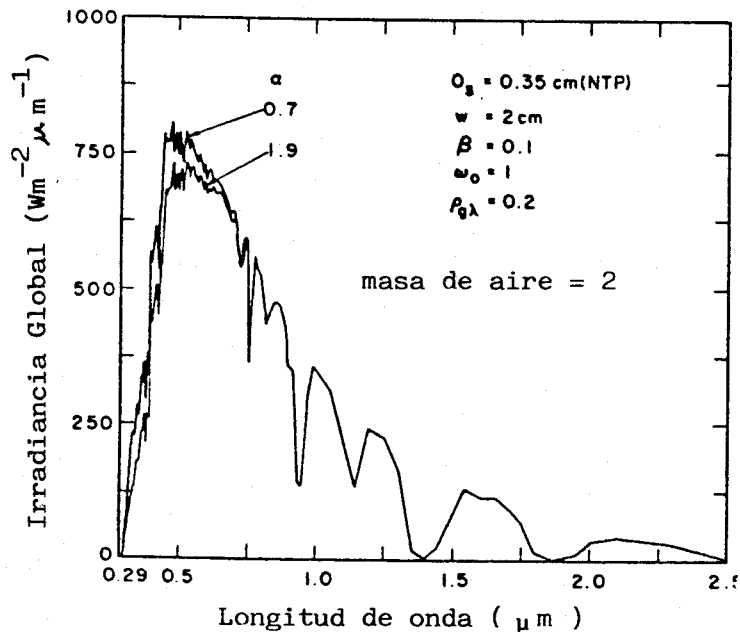


Fig. VI.10. Variación de la irradiancia global espectral en función del parámetro α .

Por último, un aumento del albedo, da lugar a un aumento de la irradiancia global debido a los efectos de reflexión múltiple, aunque estos cambios influyen más bien en la zona del ultravioleta y visible. Sobre la irradiancia directa, el albedo no tiene evidentemente ningún efecto. La Fig. VI.11 pone de manifiesto la influencia del albedo sobre la irradiancia global.

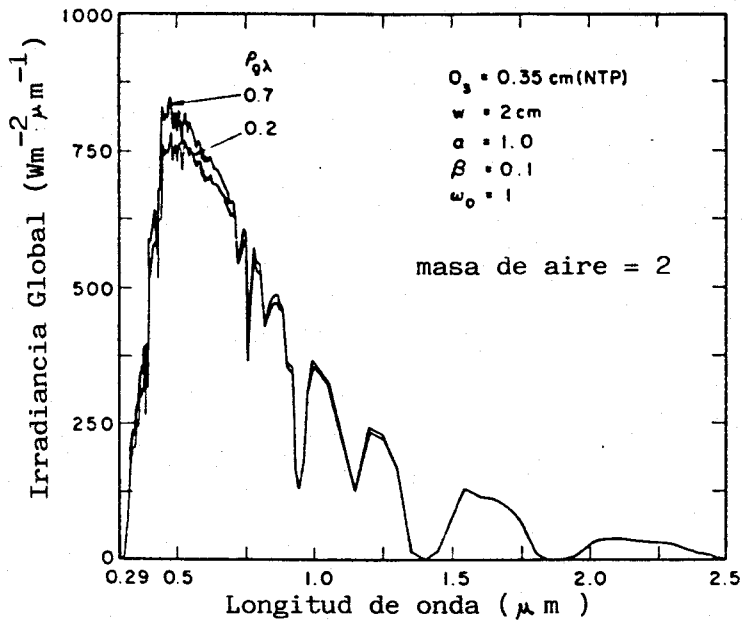


Fig. VI.11. Variación de la irradiancia global al variar el albedo.

Por último, puede verse en la Fig. VI.12 las proporciones de difusa y directa que componen la irradiancia global para un día - sin nubes típico con masa de aire 2.

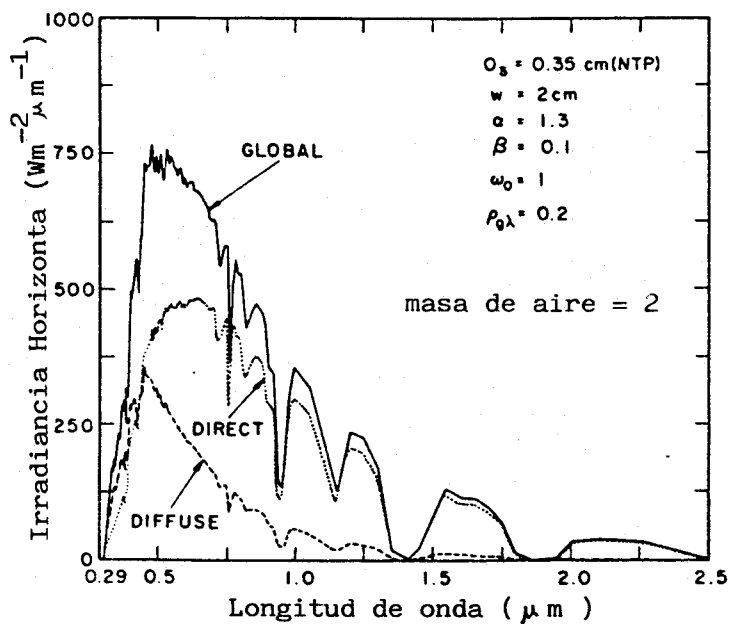


Fig. VI.12. Variación espectral de la irradiancia difusa, directa y global para un día claro y con los parámetros físicos - dados.

Después de haber hecho un estudio sintetizado de la influencia de los parámetros atmosféricos sobre los componentes de la radiación, resulta evidente porqué para un mismo valor de la irradiancia global horizontal, le pueden corresponder varios valores de la irradiancia difusa horizontal en función del valor que tengan en ese instante los parámetros atmosféricos más influyentes, como son β , α , masa de aire y albedo. Al variar éstos, el piranómetro que mide global horizontal, no detecta de forma apreciable estos cambios, por el efecto compensado que producen éstos sobre la suma de difusa y directa. Sin embargo, el pirheliómetro que mide directa sí se ve afectado por estos cambios, así como también la componente difusa, según se ha podido observar.

Es pues esta la causa por la que es casi imposible el que con sólo datos de radiación global y difusa, se pueda obtener una correlación instantánea u horaria entre valores de difusa y global, debido a las fuertes dispersiones que se pueden encontrar que, como ya se ha puesto de manifiesto, no es fruto de las medidas, sino de la complejidad y variabilidad de la composición atmosférica.

La Tabla VI.1, recoge la influencia sobre los componentes de radiación de los parámetros atmosféricos, para días claros (sin nubes).

Tabla VI.1. Influencia de parámetros atmosféricos sobre la radiación.

INCREMENTO DE:	DIFUSA	DIRECTA	GLOBAL
Masa de aire	Disminuye	Disminuye	Disminuye
β	Aumenta	Disminuye	Sensiblemente igual
α	Aumenta ligeramente	Disminuye ligeramente	Efecto compensado
Albedo	Aumenta	No le afecta	Aumenta ligeramente en el visible y ultravioleta.

VI.3.- Base y procesamiento de datos.

La base de datos empleada en los cálculos referidos a este capítulo la constituyen los pares de valores $M_t - M_d$ correspondientes a las distintas alturas del sol, que se encuentran almacenados en los ficheros "ORDENADOX", que han sido descritos en el capítulo V, apartado V.2.

A partir de estos ficheros, se ha efectuado el siguiente proceso de datos:

1. Selección de pares M_t, M_d comprendidos en un pequeño intervalo de M_t y para una altura determinada. Programa "SELEC".

2. Elaboración de un programa "CUADRICULA", capaz de dividir la superficie $M_t - M_d$ en cuadrículas. En cada cuadrícula está contenido el número de puntos que corresponde al intervalo $M_t - M_d$. Las cuadrículas se eligen con flexibilidad, pudiendo ser de mayor o menor tamaño, según convenga. Los resultados se graban en un fichero llamado "DATO $M_t - M_d$ ".

3. Elaboración de un programa "FRE-Md", capaz de dibujar los histogramas de frecuencia que se pueden obtener a partir de los resultados obtenidos con el programa "CUADRICULA".

4. A la vista de los histogramas de frecuencia, se ha procedido, para días sin nubes, a la elaboración de un programa, llamado "GAMMA", capaz de seleccionar un conjunto de puntos contenidos dentro de una banda de valores M_t , M_d y ajustar a este conjunto de puntos una función gamma de dos parámetros.

Con los parámetros de la función gamma así obtenidos, se está en condiciones de calcular, para un valor dado de la irradiancia global, cuál es el valor más probable de irradiancia difusa que se puede obtener y cuál es la probabilidad en que se puede dar dentro de la banda elegida cualquier valor de irradiancia difusa y en concreto el correspondiente al más probable.

VI.4.- Distribuciones observadas de irradiancia difusa en torno a un mismo valor de irradiancia global para diversas alturas del sol.

A la vista de las Figs. V.2 a V.8, del capítulo V, dada la gran dispersión de valores M_d en torno a un mismo valor de M_t , se ha procedido, para las distintas alturas del sol, a estudiar cómo se distribuyen los valores M_d dentro de un intervalo muy pequeño de M_t . Estos resultados se recogen en la Tabla VI.2, y corresponden al intervalo de M_t comprendido entre 0.65 y 0.66; es decir, $\Delta M_t = 0.01$.

Del análisis de esta tabla, se deduce que existen valores de M_d más probables que ningún otro. Además, a medida que la altura va aumentando desde 10° hasta 70° , se observa que el valor más probable de la componente difusa va disminuyendo. En concreto, para el intervalo

Mt estudiado a 10° de altura, el máximo número de puntos Md está comprendido entre 0.25 y 0.35, mientras que para 60° de altura solar, el máximo está comprendido entre 0.15 y 0.20.

Tabla VI.2. Distribución de la irradiancia difusa con la altura para valores de la irradiancia global comprendida en un - cierto intervalo.

Md	ALTURA	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
	(0.1, 0.15]		0	6	7	11	14	2
(0.15, 0.2]		0	20	18	14	15	16	5
$\frac{0.65 < Mt \leq 0.66}{Mt = I_{gh}/I_{oh}}$	(0.2, 0.25]	2	18	17	20	12	5	3
	(0.25, 0.3]	4	16	21	8	7	1	2
	(0.3, 0.35]	5	5	10	7	1	2	0
	(0.35, 0.4]	2	7	2	5	4	3	3
	(0.4, 0.45]	0	2	2	0	1	3	1
	(0.45, 0.5]	1	0	1	1	0	0	0

Tomando la altura de 30°, se decidió hacer un histograma donde para el intervalo elegido de Mt, (0.65, 0.66] encontrar las distribuciones de frecuencias de los valores de Md. El resultado puede verse en la Fig. VI.13. Como muestra esta figura de nuevo, existen intervalos de Md para un intervalo de Mt que son más probables que los otros. Igual ocurre para las otras alturas.

Md	Mg	Frec. (%)
(0.1, 0.15)	7	8.97
(0.15, 0.2)	18	23
(0.2, 0.25)	17	21.79
(0.25, 0.3)	21	26.92
(0.3, 0.35)	10	12.82
(0.35, 0.4)	2	2.56
(0.4, 0.45)	2	2.56
(0.45, 0.5)	1	1.28

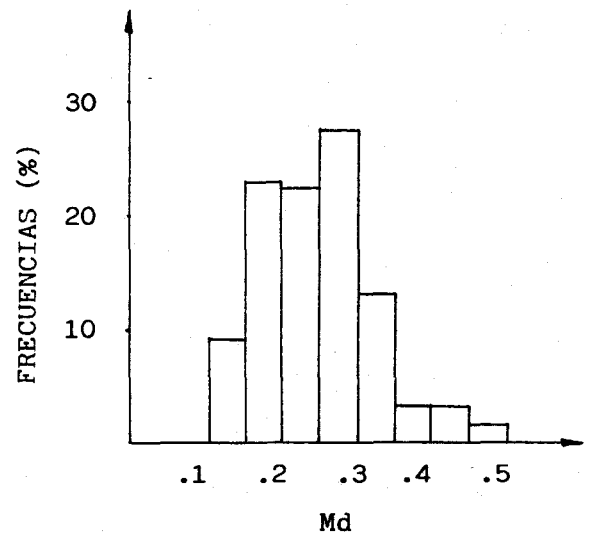


Fig. VI.13. Histograma de frecuencia de Md para el intervalo de - Mt comprendido entre 0.65 y 0.66.

Dado que el intervalo de Mt era muy fino, se decidió hacer de una manera sistemática la cuadrícula del espacio Mt, Md para todas las alturas posibles. Esto se hace con el programa CUADRICULA, ya mencionado. Las tablas VI.3 a VI.9 representan los resultados obtenidos para las alturas de 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70°, respectivamente.

Tabla VI.4. Variación de Md frente a Mt para una elevación en 20°.

Md

ALTURA: 20
INTERVALOS

	.025	.05	.075	.1	.125	.15	.175	.2	.225	.25	.275	.3	.325	.35	.375	.4	.425	.45	.475	.5	.525	.55	.575	.6	NT
.025	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
.05	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
.075	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
.1	0	0	3	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43
.125	0	0	1	1	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48
.15	0	0	0	0	1	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58
.175	0	0	0	0	0	1	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41
.2	0	0	0	0	2	0	3	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47
.225	0	0	0	0	1	1	0	4	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53
.25	0	2	1	0	0	1	1	1	8	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81
.275	0	0	2	1	0	1	0	0	0	7	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54
.3	0	1	0	1	1	0	0	0	0	2	4	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48
.325	0	1	0	0	0	0	2	0	2	3	2	13	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62
.35	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	4	3	14	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51
.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	8	11	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51
.4	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	5	2	6	8	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	54
.425	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3	4	0	9	4	11	9	11	0	0	0	0	0	0	0	54
.45	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4	3	3	10	3	3	8	8	7	0	0	0	0	0	0	53
.475	0	0	0	0	0	0	2	3	4	8	5	2	4	6	6	4	3	6	4	0	0	0	0	0	57
.5	0	0	0	0	1	0	3	3	6	10	7	13	9	6	5	3	0	1	1	2	0	0	0	0	70
.525	0	0	0	0	0	3	3	8	11	11	16	9	10	8	12	6	4	4	4	2	2	0	0	0	113
.55	0	0	0	2	1	7	8	9	17	13	20	11	18	12	14	11	8	3	2	2	2	1	0	0	161
.575	0	0	0	1	5	6	11	18	22	19	10	18	12	16	5	7	6	1	1	1	1	1	3	0	164
.6	0	0	0	4	8	12	12	24	22	12	14	19	13	7	8	10	3	1	1	4	0	1	0	0	175
.625	0	0	0	1	10	15	15	17	25	28	23	18	21	7	4	2	7	1	1	0	1	0	1	0	197
.65	0	0	0	1	7	20	16	37	32	25	18	18	10	13	13	5	3	1	1	1	1	0	0	0	222
.675	0	0	0	0	4	13	29	32	22	20	20	17	9	7	5	6	4	0	0	0	0	0	0	0	188
.7	0	0	0	0	2	7	18	28	21	14	15	6	8	3	2	3	4	3	0	2	0	0	0	0	136
.725	0	0	0	0	2	5	9	21	15	10	13	6	8	4	3	6	1	3	0	0	0	0	0	0	106
.75	0	0	0	0	0	2	7	9	13	4	8	6	4	1	5	1	0	1	1	0	0	0	0	0	62
.775	0	0	0	0	1	0	2	3	6	7	2	4	2	3	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	39
.8	0	0	0	0	0	1	0	2	3	5	3	4	1	0	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	26
.825	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	4	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
.85	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	4	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
.875	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
.9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7

Mt

Por otra parte, las Figs. VI.14 a VI.18 muestran los histogramas de frecuencias de Md para una altura del sol de 30 grados, en los intervalos de Mt indicados en las mismas y que corresponden a los valores expresados en la tabla VI.5.

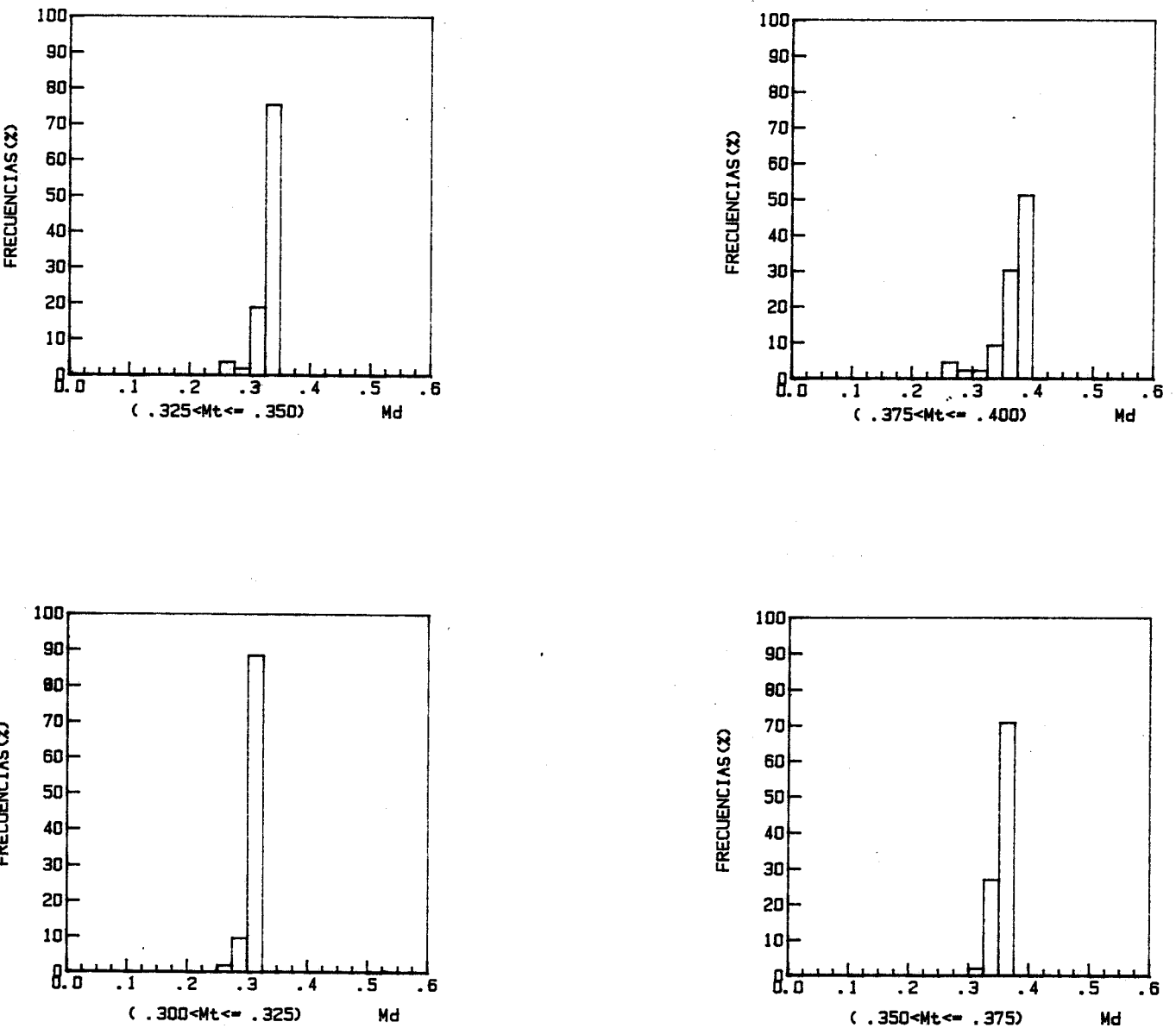


Fig. VI.14. Distribución de frecuencias de Md para valores de Mt comprendidos entre 0.3 y 0.4.

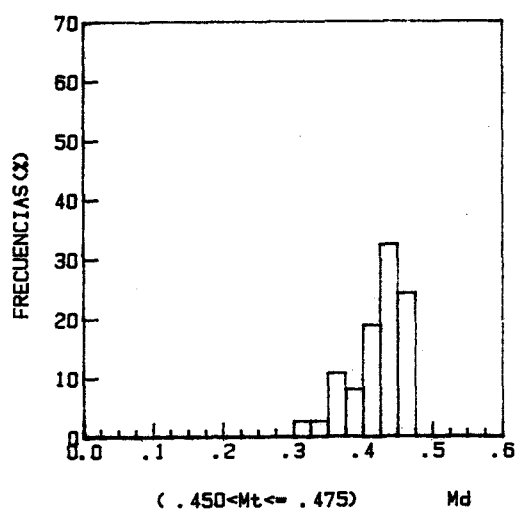
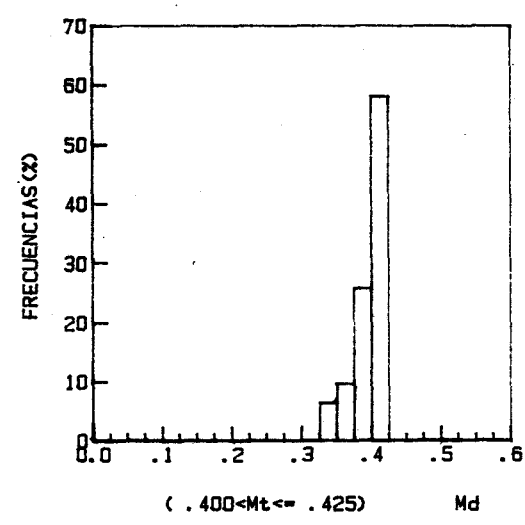
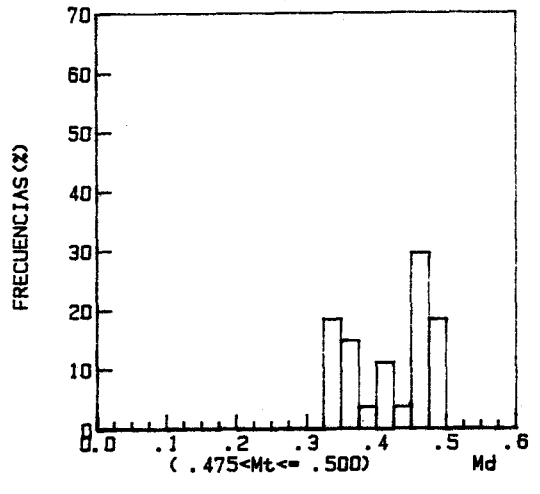
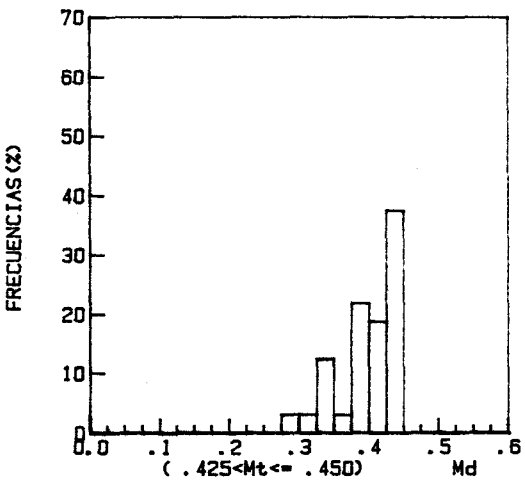


Fig. VI.15. Distribución de frecuencias de Md para valores comprendidos entre 0.4 y 0.5.

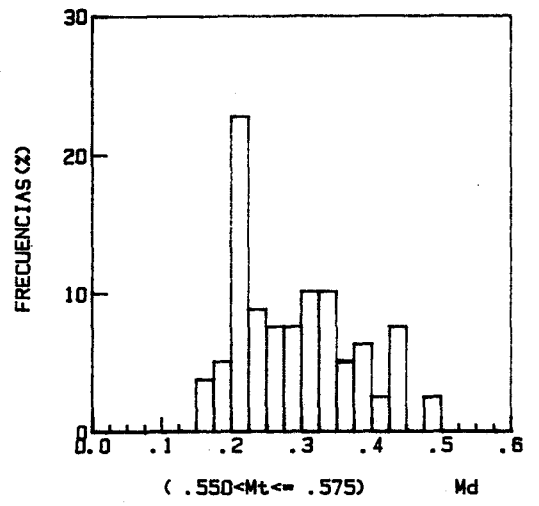
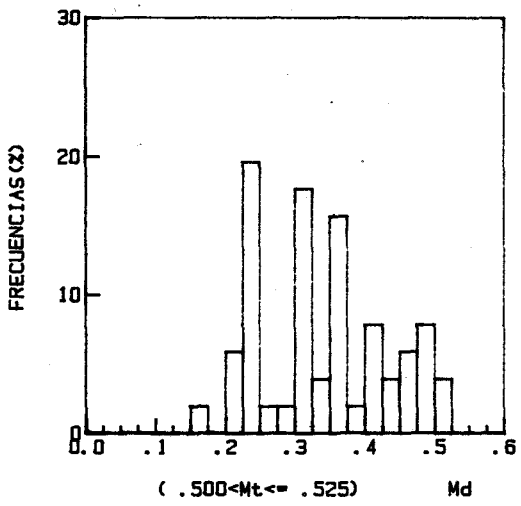
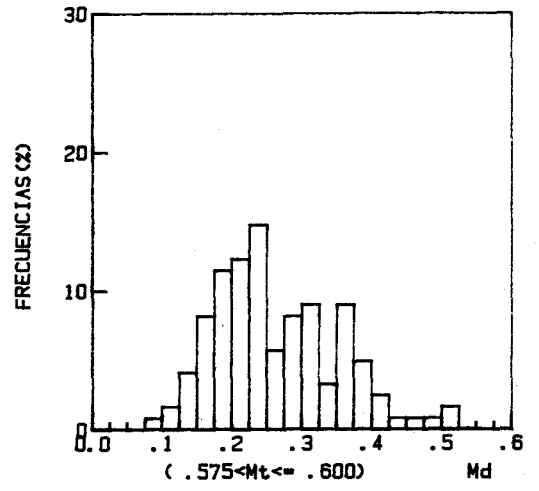
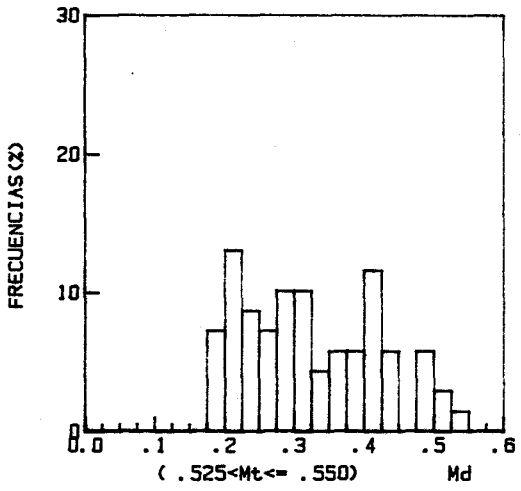


Fig. VI.16. Distribución de frecuencias de Md, para valores de Mt comprendidos entre 0.5 y 0.6.

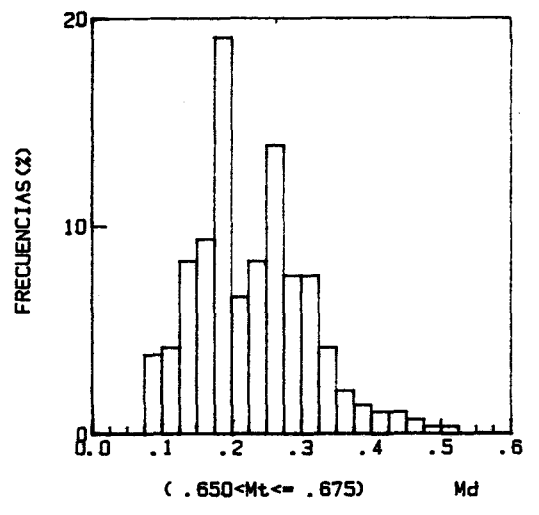
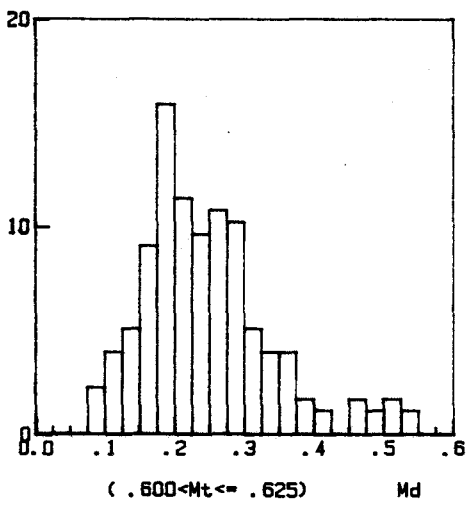
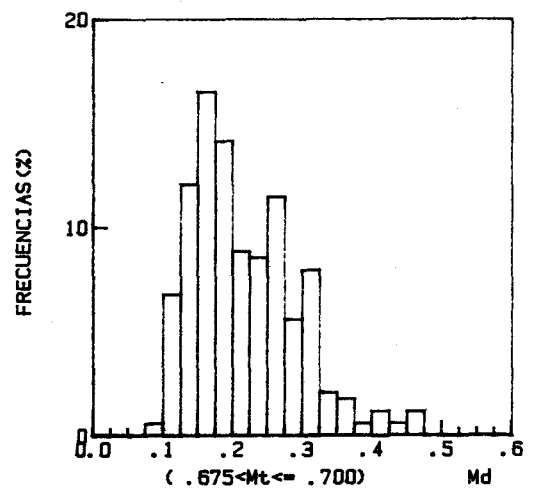
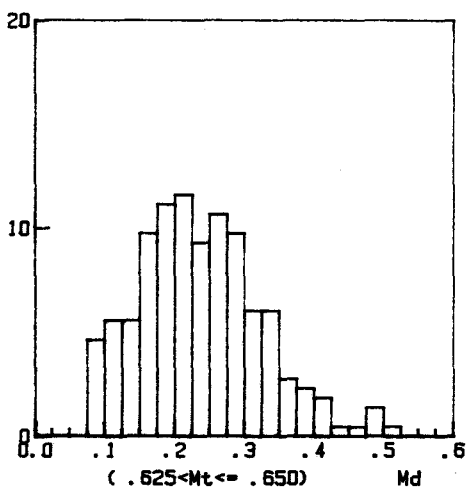


Fig. VI.17. Distribución de frecuencias de Md para valores de Mt comprendidos entre 0.6 y 0.7.

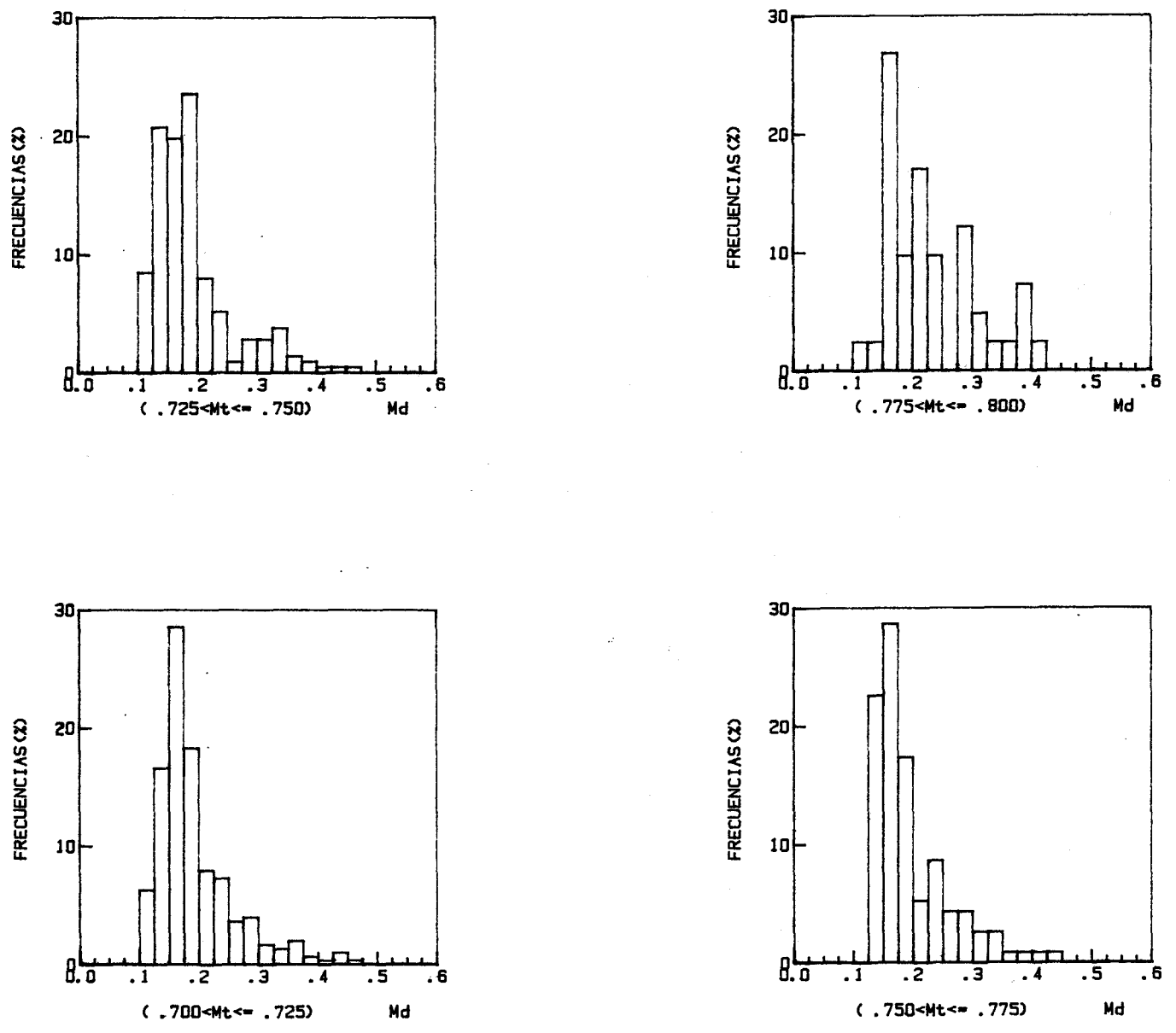


Fig. VI.18. Distribución de frecuencias de Md para valores de Mt comprendidos entre 0.7 y 0.8.

Como puede verse en las tablas VI.3 a VI.9, existen dos distribuciones bien diferenciadas. De un lado, se observa una distribución lineal, hasta un intervalor de M_t comprendido aproximadamente, entre 0.3 y 0.35. De otro, se observa una dispersión de valores de M_d que es mayor a medida que aumenta M_t , para reducirse la dispersión a partir de M_t igual a 0.6, donde los valores de M_d se agrupan más en torno a un valor determinado dependiendo éste de la altura solar considerada.

Es evidente que estamos ante la presencia de como mínimo dos distribuciones diferentes: la distribución lineal o determinista, donde para un valor de M_t le corresponde un único valor de M_d , y la distribución formada por el resto de los pares de puntos de naturaleza aparentemente aleatoria.

Las causas de esta dispersión han sido justificadas en el apartado VI.2. Analizando cómo se distribuyen los valores de M_d dentro de una banda $M_t \pm \Delta M_t$, se pueden modelizar analíticamente estas distribuciones. Planteamos, a continuación, qué criterios objetivos se podrían aplicar para encontrar el punto de corte de ambas distribuciones, la lineal y la aparentemente aleatoria, con objeto de estudiarlas separadamente. El criterio seguido fue la aplicación del test de Rubens. Este test tiene su fundamento en la variación que experimenta la pendiente de la recta deseada, obtenida ajustando los puntos dentro de una cuadrícula e incluyendo mediante procesos iterativos los puntos contenidos en las sucesivas cuadrículas. En el momento que la inclusión de un punto de una cuadrícula haga que la pendiente de la recta varíe, al nivel de confianza fijado, se interrumpe el proceso iterativo y da cuál es el último punto para el cual, él y los anteriores se pueden considerar que poseen

una distribución lineal.

El resultado del test coincide prácticamente con lo observado a simple vista en las distribuciones $M_t - M_d$. Así, por ejemplo, para la altura de 30° , el último punto $M_t - M_d$, donde la distribución es una recta, con un nivel de significación del 99,9% es el $M_t = 0.289$, $M_d = 0.288$ y esto podría haberse obtenido de la simple inspección de la tabla correspondiente a 30° .

Si el nivel de significación lo fijamos en el 99.5%, el punto de corte de $M_t = 0.394$, $M_d = 0.392$ y naturalmente, a medida que bajemos el nivel de significación, el punto de corte sale más hacia la derecha. Así, para un nivel del 99% el punto de corte de $M_t = 0.462$, $M_d = 0.428$ y para un nivel del 95% $M_t = 0.513$, $M_d = 0.213$. Es evidente que tenemos que afinar mucho en la elección del nivel de significación, pues lo que es normal en la mayoría de los fenómenos físicos, la elección del 95%, a nosotros nos produciría un gravísimo error. Creemos que nuestra exigencia debe ser del 99.9%.

VI.5.- Ajuste de funciones de distribución gamma de la irradiancia difusa correspondiente a una banda de irradiancia global.

En este apartado se ha tratado de modelizar qué tipo de distribución corresponde a los valores de M_d que están dentro de una banda de $M_t \pm \Delta M_t$. Esto se ha hecho para valores de M_t mayores de 0.4 para la altura de 30° , y para valores de M_t mayores a 0.6 para las demás alturas.

La metodología empleada, que puede extenderse a cualquier altura del sol e incluso a cualquier proceso similar no dependiente de la altura del sol, consta de los siguientes pasos :

1. Estudio de la forma que adquieren las distribuciones de frecuencia de M_d para una banda $M_t \pm \Delta M_t$.

Esto se realiza a partir del resultado obtenido en el apartado VI.4. En esencia es observar la forma de los histogramas de frecuencias para ver a qué modelo de las distribuciones típicas conocidas se le parece más. Para ello nos valemos de los programas "CUADRICULA" y "FRMd".

2. Ajuste de la distribución densidad gamma.

Elegido el modelo o los modelos de distribuciones, se someten todos los puntos M_d contenidos dentro de la banda de M_t a la técnica usual de ajuste de la distribución correspondiente. Dada la semejanza que para nosotros tenía la forma de los histogramas a una función gamma, se han ajustado los valores M_d a una distribución gamma de dos parámetros. Esto se ha hecho con el programa GAMMA.

La familia de distribuciones gamma viene dada mediante su función densidad de dos parámetros:

$$f(x) = \frac{a^r}{\Gamma(r)} e^{-ax} x^{r-1} \quad x > 0$$

$$y \quad \Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx \quad \text{converge si} \quad r > 0$$

para $x < 0$, $f(x) = 0$

Los parámetros a y r son los que hay que estimar en el proceso de ajuste a partir de los puntos experimentales.

Los estimadores de los momentos para estos parámetros son respectivamente :

$$a = \frac{\bar{x}}{s^2} \quad ; \quad r = \frac{\bar{x}}{s^2} \quad ; \quad \bar{x} = r/a$$

siendo $\bar{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, covarianza muestral de las n observaciones x_1, x_2, \dots, x_n .

Los estimadores máximo-verosimilitud se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$r = a \bar{x}$$

$$\Gamma'(r) = \Gamma(r) \left(\ln a + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \right)$$

resultante de maximizar la función de verosimilitud

$$L(a, r) = \frac{a^{nr}}{\Gamma(r)^n} e^{-a x_i} (\prod x_i)^{r-1}$$

con respecto a los parámetros a y r .

Numericamente obtenemos, siendo :

$$M = \ln \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

las siguientes estimaciones:

$$r = 0.5000876/M + 0.1648852 - 0.0544276M$$

$$\text{para } 0 \leq M \leq 0.5772$$

$$r = (8.898919/M + 9.05995 + 0.9775373M) / (17.79728 + 11.968477M + M^2)$$

$$\text{para } 0.5772 < M \leq 17$$

$$r = 1/M \quad \text{para } M > 17$$

y posteriormente $a = r/\bar{x}$

Una vez transformados los datos originales, son tabulados - en K clases :

$$C_1 = |0, a(1)|$$

$$C_2 = |a(1), a(2)|$$

$$C_K = |a(K-1), a(K)|$$

siendo $a(K) = \text{máx}(x_i)$ y $\delta = a(K) / K$, la amplitud de los intervalos.

Las ~~frecuencias~~ frecuencias absolutas observadas en cada clase se obtienen contando el número de observaciones x_i que pertenecen a cada una:

$$n_1, n_2, \dots, n_K$$

y las frecuencias absolutas estimadas en cada clase:

$$E_1, E_2, \dots, E_K$$

se obtienen mediante la expresión:

$$E_j = n \int_{a(j-1)}^{a(j)} f(x) dx \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, K$$

Estas frecuencias se utilizan para el test de ajuste de los datos a la distribución gamma, basado en el estadístico del cociente de verosimilitud :

$$G = 2 \sum_{j=1}^n E_j \cdot \ln (E_j/n_j)$$

o con su aproximación de Pearson

$$P = \sum_{j=1}^K (E_j - n_j)^2 / E_j$$

cuya distribución asintótica bajo la hipótesis de ajuste es una chi-cuadrado con $K - 3$ grados de libertad aproximadamente.

Por otra parte, haciendo la transformación $r = \alpha y$ $a = \frac{1}{\beta}$, la función densidad gamma toma la forma :

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-x/\beta} x^{\alpha-1}$$

Las propiedades de esta función gamma de dos parámetros, donde α es el parámetro de forma y β es el parámetro de escala son:

a. La moda o valor más probable.

$$m = \beta (\alpha - 1)$$

ya que
$$\frac{d f(x)}{dx} = 0 = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} [(\alpha - 1) x^{\alpha-2} e^{-x/\beta} - \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta} x^{\alpha-1}]$$

de donde

$$(\alpha - 1) e^{-x/\beta} = \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta} x^{\alpha-1} \quad y$$

simplificando obtenemos:

$$\text{moda} = \text{valor más probable} = \beta (\alpha - 1) \quad \text{ó} \quad \frac{r - 1}{a}$$

b. La esperanza matemática, que coincide con la media aritmética, vale:

$$\bar{X} = \alpha \cdot \beta \quad \text{ó} \quad \frac{r}{a}$$

c. La varianza es:

$$S^2 = \alpha \cdot \beta^2 \quad \text{ó} \quad \frac{r}{a^2}$$

$$\text{Combinando 2 y 3 obtenemos : } S^2 = \bar{x}^2 / r$$

d. El coeficiente de asimetría es:

$$\gamma_1 = 2/\sqrt{\alpha}$$

e. El coeficiente de Curtosis es :

$$\gamma_2 = 3 + 6/\alpha$$

f. Empleamos la fórmula de Stirling para el cálculo de la función gamma:

$$\ln \Gamma(r) = (r - \frac{1}{2}) \ln (r) - r + \frac{1}{2} \ln (2 \cdot \pi) + R (r)$$

siendo

$$R (r) = \frac{1}{12 r} - \frac{1}{360 r^3} + \dots$$

De tal modo que el coeficiente de la función densidad gamma

$K = a^r / \Gamma(r)$ vale:

$$K = \frac{a^r}{\exp \left[(r - \frac{1}{2}) \ln r - r + \frac{1}{2} \ln (2 \pi) + \frac{1}{12r} - \frac{1}{360r^3} \right]}$$

Estos dos últimos coeficientes son independientes de β .

El cálculo de los coeficientes a y r de la función densidad gamma obtenido por el método de los momentos, es satisfactorio si el coeficiente de asimetría $\gamma_1 = 2/\sqrt{\alpha}$ es pequeño, o si α es relativamente grande y si los valores calculados del coeficiente de asimetría C_S como estimador de γ_1 y K como estimador de γ_2 son aproximadamente iguales a $2/\sqrt{\alpha}$ y $3 + 6/\alpha$. Sin embargo, si C_S es suficientemente grande, ($C_S > 0.5$) debe ser utilizado el método de la máxima verosimilitud para la determinación de α , β y γ_1 y para la comprobación de la bondad del ajuste, el método de χ^2 ó el test de Kolmogorov-Smirnov. No obstante, hemos utilizado el método de la máxima verosimilitud descrito brevemente para no tener ningún tipo de restricción, aunque también a veces hemos comprobado algunos resultados con el método de los momentos.

VI.5.1.- Función densidad gamma de tres parámetros. Test de Kolmogorov-Smirnov.

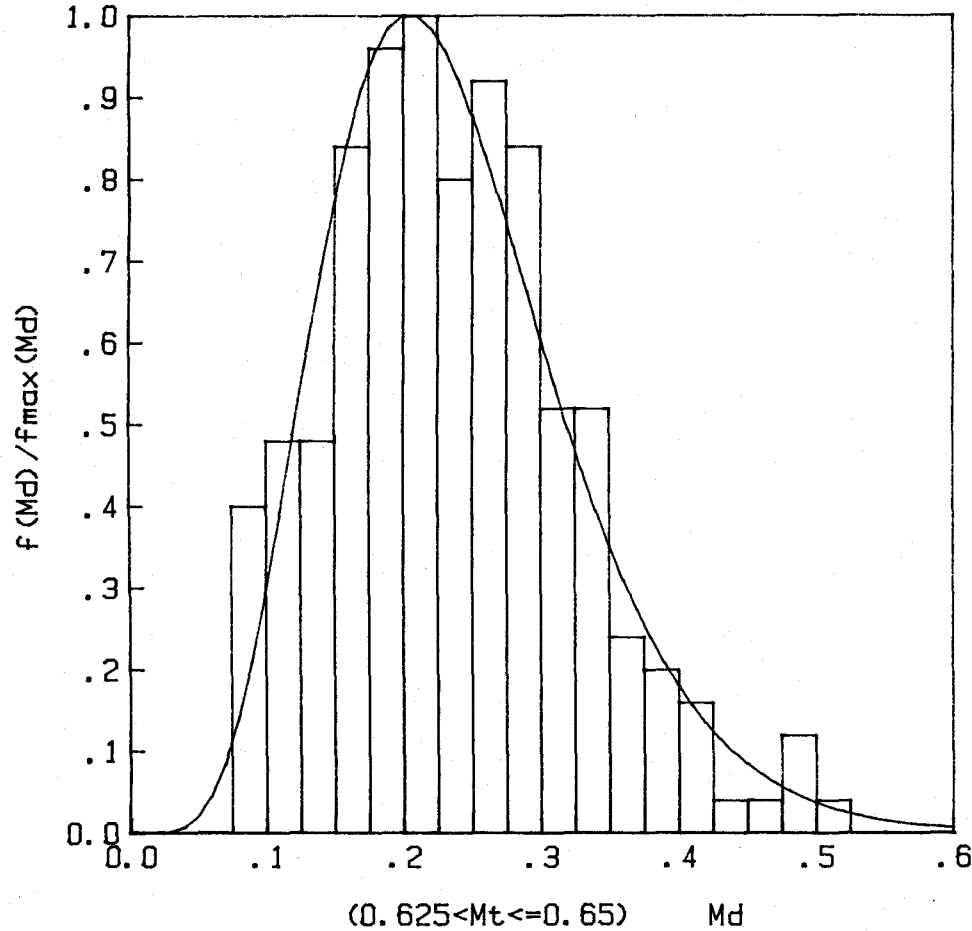
Para hallar la bondad del ajuste de la función densidad gamma de dos parámetros, se ha aplicado el test de bondad dado por el estadístico del cociente de verosimilitudes G o su aproximación de Pearson, conocida como chi-cuadrado, definida anteriormente.

Dado que la chi-cuadrado, depende de las frecuencias observadas y estimadas, el valor de χ^2 es diferente según sea el agrupamiento de los datos en clases.

En la Fig. VI.19, se muestra un ajuste gamma de dos parámetros a los datos experimentales que están dentro de la banda Mt comprendida entre 0.625 y 0.65. Se pone de manifiesto la correspondencia entre las frecuencias observadas y estimadas, especialmente a partir de frecuencias superiores a 5. La bondad del ajuste dado por χ^2 es aceptable al 95% del nivel de confianza. Si los datos experimentales se agrupan en clases diferentes a las obtenidas así, se encuentra que la bondad del ajuste dado por χ^2 no es aceptable al nivel elegido, que ha sido del 95%.

Por esto, se necesita aplicar un criterio de bondad que sea independiente del agrupamiento de los datos en clases. Este criterio es el de Kolmogorov-Smirnov.

ALTURA DEL SOL: 30 GRADOS
 A= 29.36 R= 7 M_{dmodal}= .204



FR. ESTIMADA	FR. REAL	INTER. DE Md
00.00	00	0.000--0.025
00.17	00	0.025--0.050
01.42	00	0.050--0.075
04.88	10	0.075--0.100
10.43	12	0.100--0.125
16.63	12	0.125--0.150
21.74	21	0.150--0.175
24.67	24	0.175--0.200
25.14	25	0.200--0.225
23.57	20	0.225--0.250
20.66	23	0.250--0.275
17.15	21	0.275--0.300
13.60	13	0.300--0.325
10.38	13	0.325--0.350
07.66	06	0.350--0.375
05.49	05	0.375--0.400
03.84	04	0.400--0.425
02.63	01	0.425--0.450
01.76	01	0.450--0.475
01.16	03	0.475--0.500
00.75	01	0.500--0.525
00.48	00	0.525--0.550
00.30	00	0.550--0.575
00.19	00	0.575--0.600

Fig. VI.19. Función densidad gamma y comparación entre las frecuencias estimada y real.



Las diferencias básicas entre los dos test, el de la prueba chi-cuadrado y el de Kolmogorov-Smirnov, es que la χ^2 es sensible a las desviaciones verticales entre los histogramas estimados y observados, mientras que el test de Kolmogorov-Smirnov se basa en las desviaciones verticales entre las funciones de distribución acumuladas estimadas y observadas.

Además, la prueba chi-cuadrado requiere el agrupamiento de los datos en clases como ya se ha mencionado mientras que con el criterio de Kolmogorov-Smirnov no se necesita.

En definitiva, el test de Kolmogorov-Smirnov permite examinar la bondad del ajuste para n observaciones en lugar de sólo K clases, siendo $K \leq n$. En este sentido el criterio de Kolmogorov-Smirnov permite un uso completo de los datos disponibles. Por otra parte, la prueba chi-cuadrado está afectada por el número de clases y su anchura, que elegimos arbitrariamente.

La aplicación del criterio de Kolmogorov-Smirnov consiste en formar los estadísticos $F(x)$ correspondiente a la distribución acumulada teórica y $S(x)$ correspondiente a la distribución acumulada experimental y se obtiene el mayor valor absoluto de las diferencias $|F(x) - S(x)|$. El valor máximo de estas diferencias se compara con el estadístico :

$$D_{n, \alpha} = Z_{\alpha} / \sqrt{n},$$

donde el estadístico Z_{α} se puede hallar en la tabla VI.10 y depende del nivel de confianza elegido.

TABLA VI.10.

$P(D_n > Z_\alpha / \sqrt{n})$	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
Z_α	1.07	1.14	1.22	1.36	1.63

Esta tabla realmente representa una aproximación para valores de n que excedan a 35. Así, por ejemplo, para una banda que contenga 200 puntos, y fijando un nivel de confianza del 95%, Z_α es 1.36, entonces el estadístico D_n da $1.36 / \sqrt{200}$. Si la diferencia entre las funciones de distribución teórica y real es inferior a D_n dado por $1.36 / \sqrt{200}$ para 200 puntos, el ajuste es aceptable al 95% y de lo contrario es rechazable a este nivel de confianza.

No obstante, la aplicación del test de K - S tiene que hacerse conociendo el origen de la función de distribución gamma observada, porque de lo contrario se puede producir un corrimiento de las funciones de distribución teórica y ~~observada~~ y sin embargo el ajuste ser bueno. Esto nos ha llevado a un ajuste gamma de tres parámetros, uno de ellos el origen de la función gamma y los otros dos parámetros, son el de forma y el de escala.

La función densidad gamma de tres parámetros, toma la forma:

$$f(x) = \frac{a^r}{\Gamma(r)} (X - X_0)^{r-1} e^{-(X - X_0)a}, \quad X_0 \leq X \leq \infty, \quad \text{con } X_0 \neq 0$$

Los tres parámetros, como se ha dicho, son r (forma), a (escala) y X_0 (posición).

La transformación $X - X_0 = y$, reduce la función gamma de tres parámetros a una de dos parámetros.

La estimación del origen de la gamma se hace a través de un proceso iterativo, partiendo de la ecuación:

$$y = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{1 + \sqrt{1 + 4A/3} - 4A} - \frac{\bar{X} - X_0}{N} \sum \frac{1}{X_i - X_0} = 0$$

siendo

$$A = \frac{4}{3} \left| \ln(\bar{X} - X_0) - \frac{1}{N} \sum n(X_i - X_0) \right|$$

variando el valor de X_0 , hasta que 'y' sea prácticamente nulo.

La estimación de los parámetros A y R se hace de la forma ya mencionada en VI.5., utilizando el método de máxima verosimilitud.

Aún así, hemos podido comprobar que las diferencias encontradas al aplicar el test de K - S a la gamma de dos parámetros y a la gamma de tres parámetros eran insignificantes y, puesto que el proceso de ajuste es más largo y complejo, hemos optado por la gamma de dos parámetros en todo el proceso de ajuste, obteniendo resultados realmente satisfactorios en todos los casos.

VI.6.- Resultados.

Se ha aplicado la metodología mencionada en VI.5 para varias alturas del sol y para bandas de Mt que contengan suficiente número de puntos.

En general, las bandas estudiadas comienzan a partir de $Mt = 0.6$ a excepción de la altura de 30° que comienza en 0.4 .

Entre 0 y 0.4 , se sabe que las distribuciones para todas las alturas son prácticamente lineales, esto es, la componente difusa es igual a la global, ya que la pendiente de la recta se aproxima a la unidad.

No se ha hecho el intento de estudiar las distribuciones entre 0.4 y 0.6 porque no había suficientes puntos experimentales salvo para la altura 30° .

VI.6.1.- Estudio de las distribuciones para altura del sol 30°

Se ha hecho un estudio detallado para todos los valores posibles de Mt en donde hay un número suficiente de puntos, incluyendo valores correspondientes a días no claros, aunque en principio, la metodología iba dirigida sólo hacia bandas de Mt para cielos claros.

En la Tabla VI.11 se recogen los resultados para todas las bandas de Mt estudiadas. En ella, se dan los parámetros A y R de la función densidad gamma; el valor modal, Md ; el valor medio, \bar{M}_d ; la probabilidad que posee el intervalo de Md que contiene al valor modal; lo mismo pero para el valor medio; el número de puntos ajustados y finalmente el nivel de confianza seleccionado.

Es destacable que a medida que Mt se va haciendo mayor, las diferencias encontradas entre el valor modal y medio también se hacen mayores. Es máxima en la banda de Mt comprendida

entre 0.625 y 0.65, representando un 16.6% de desviación respecto al valor modal. A partir de aquí comienza de nuevo a disminuir esta diferencia, siendo de un 9,5% en la última banda.

Por otra parte, la bondad de los ajustes han sido aceptable bajo el criterio de Kolmogorov-Smirnov, con el nivel de confianza del 95%. En todos los casos las diferencias entre la función de distribución teórica y experimental no han superado el estadístico $1.36/\sqrt{n}$, donde n es el número de puntos ajustados por banda, dado en la tabla.

En las Figs. VI.20 a VI.25, se muestran las funciones densidad gamma y las funciones de distribución teórica y experimental correspondientes a cada banda.

TABLA VI.11: RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALTURA DEL SOL CORRESPONDIENTE A 30°.

INTERVALO DE Mt	A	R	Md modal	$\bar{M}d$	Probab. modal (%)	Probab. v. medio	Nº de puntos	Nivel confianza del 95% test K-Smirnov
0.4 < Mt ≤ 0.45	328.75	130.39	0.393	0.396	22	22	63	Acceptable
0.45 < Mt ≤ 0.50	181.94	76.34	0.414	0.419	17	17	64	"
0.50 < Mt ≤ 0.55	37.05	12.29	0.304	0.331	9	8	120	"
0.55 < Mt ≤ 0.575	43.78	12.8	0.269	0.292	11	8	79	"
0.575 < Mt ≤ 0.600	34.65	9.12	0.234	0.265	10	7	122	"
0.600 < Mt ≤ 0.625	29.64	7.29	0.212	0.246	11	7	176	"
0.625 < Mt ≤ 0.65	29.36	7.0	0.204	0.238	10	8	215	"
0.65 < Mt ≤ 0.675	34.51	7.9	0.199	0.229	11	8	288	"
0.675 < Mt ≤ 0.700	40.30	8.72	0.191	0.216	11	8	339	"
0.700 < Mt ≤ 0.725	55.61	10.75	0.175	0.193	15	13	301	"
0.725 < Mt ≤ 0.750	49.21	9.41	0.170	0.191	13	13	212	"
0.750 < Mt ≤ 0.775	59.06	11.63	0.179	0.197	14	14	115	"

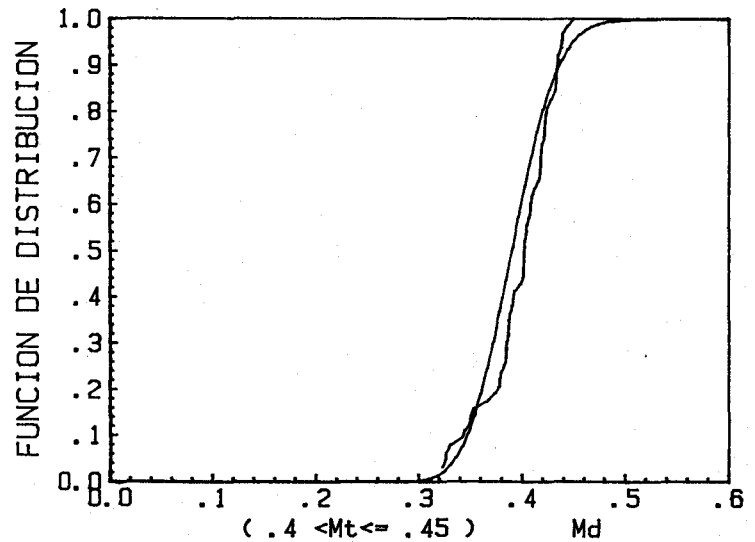
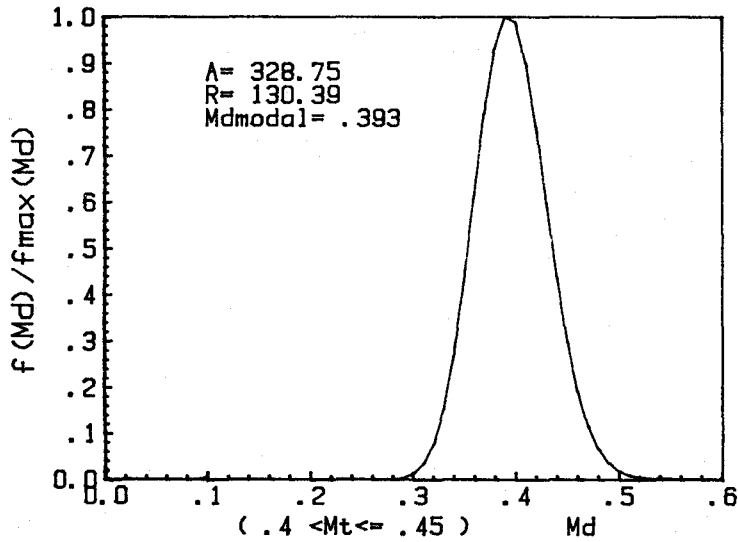
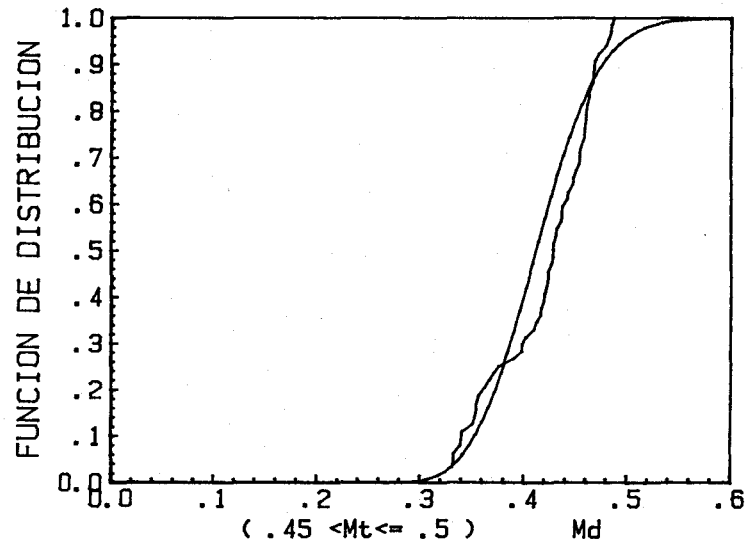
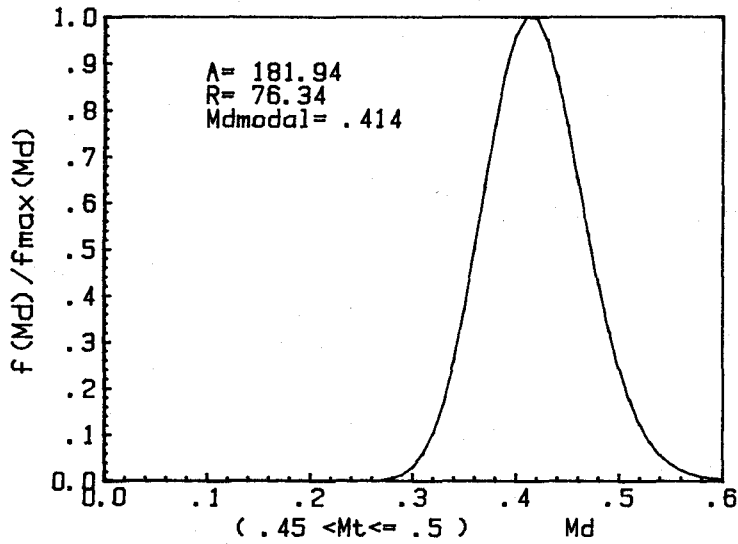


Fig. VI.20. Altura del sol 30°. Intervalo Mt 0.4 - 0.5

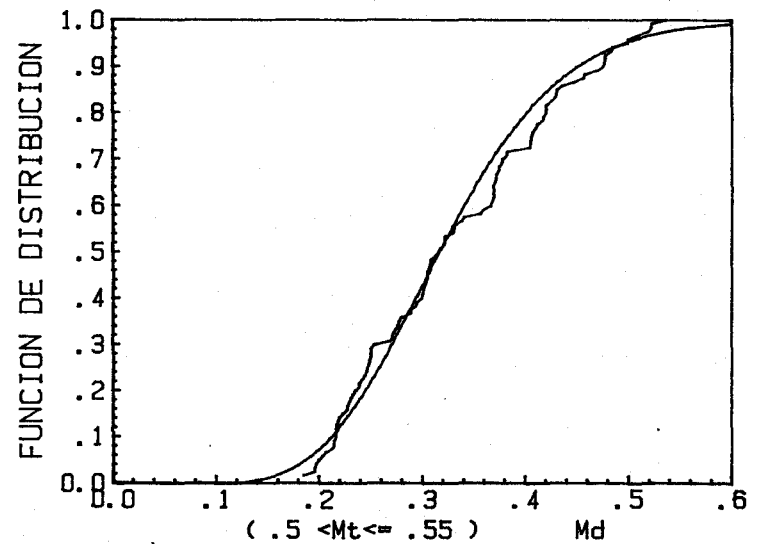
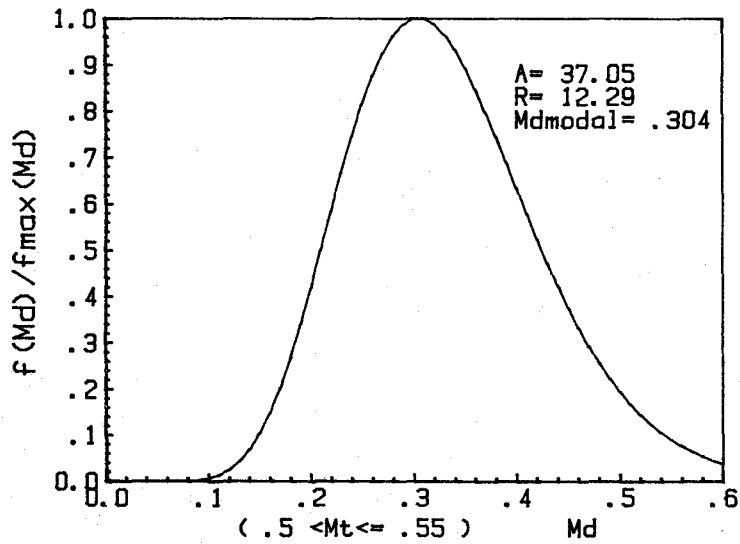
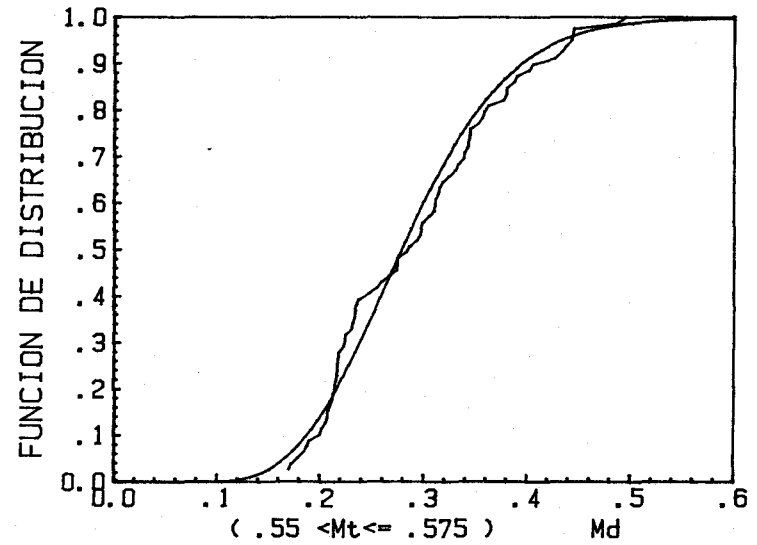
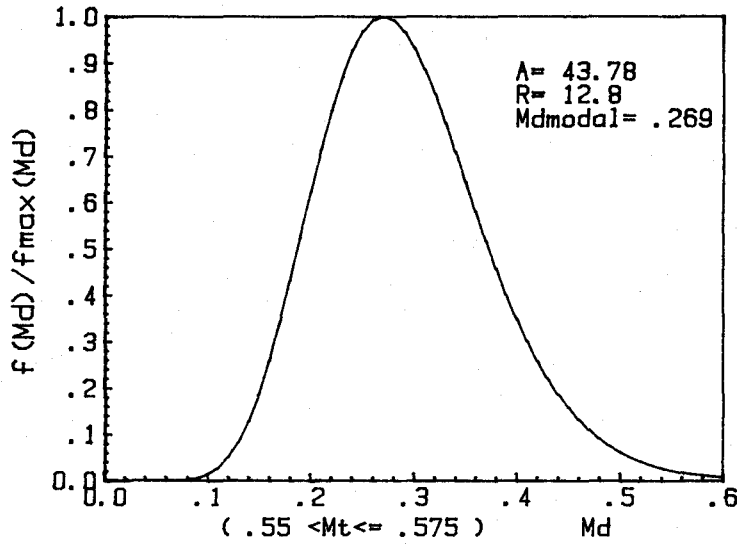


Fig. VI.21. Altura del sol 30°. Intervalo M_t 0.5 - 0.575.

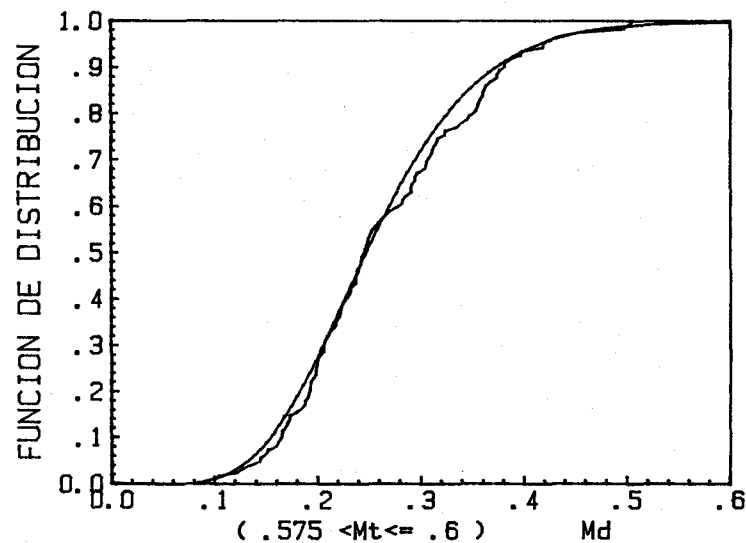
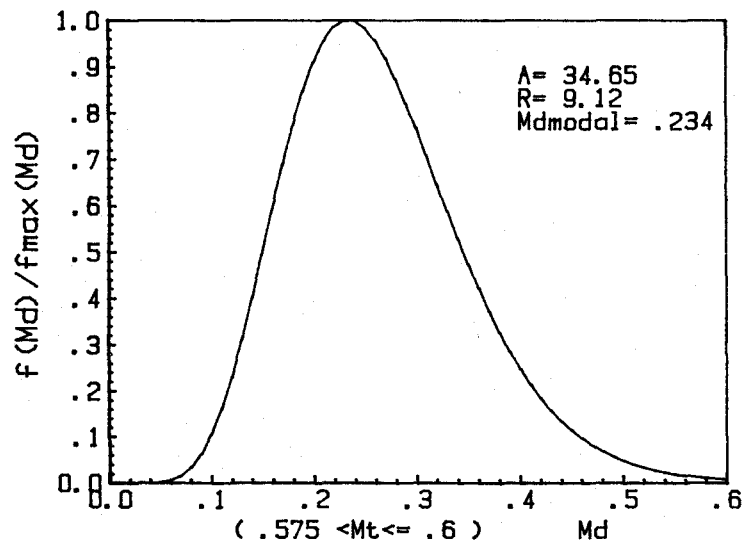
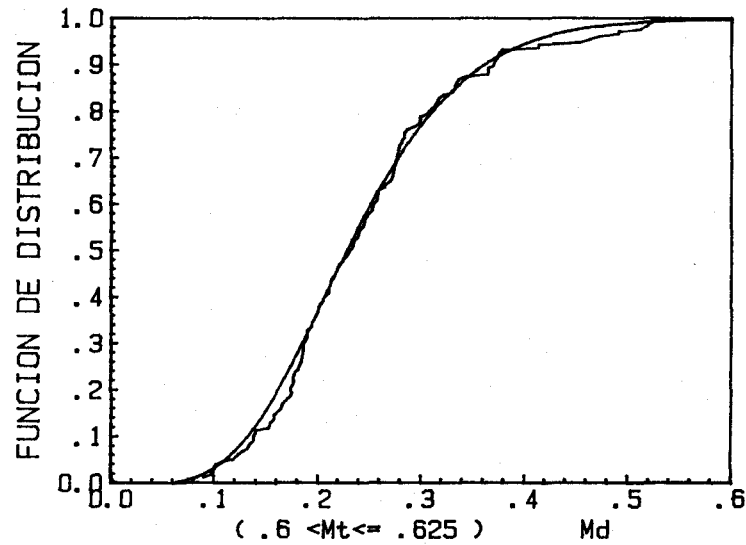
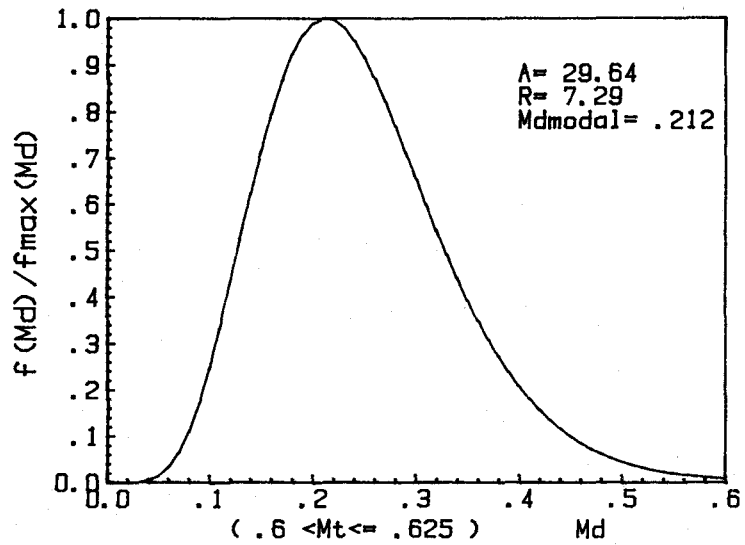


Fig. VI.22. Altura del sol 30°. Intervalo Mt 0.575 - 0.625.



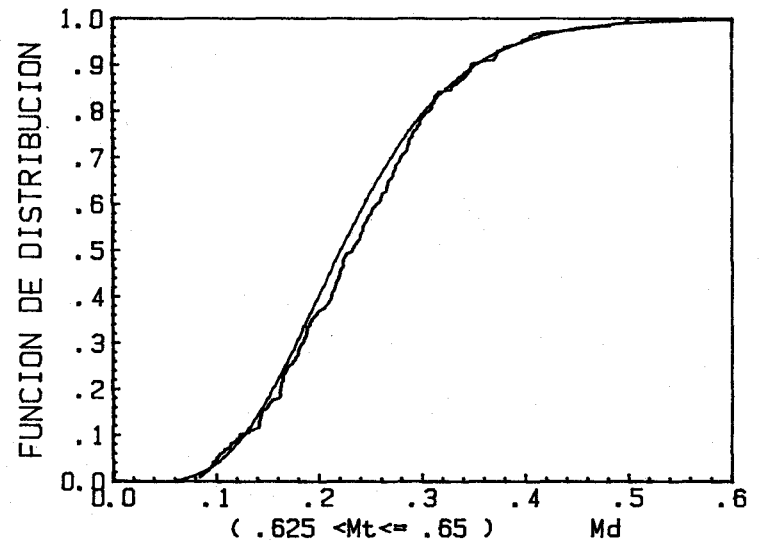
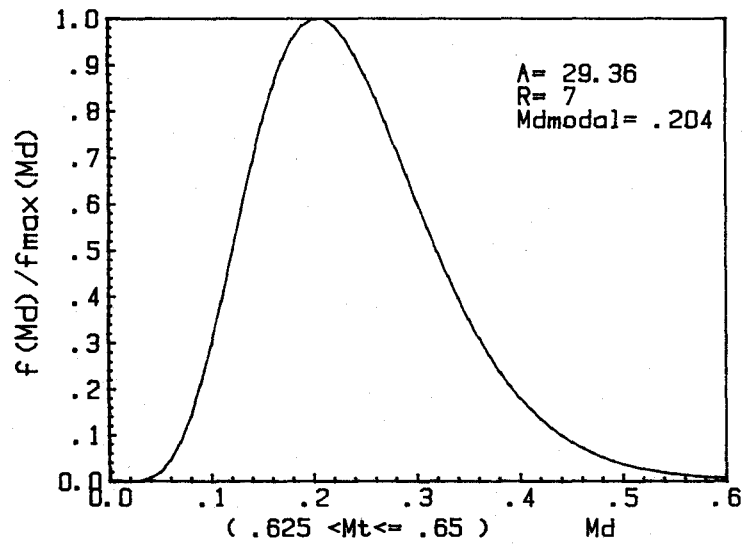
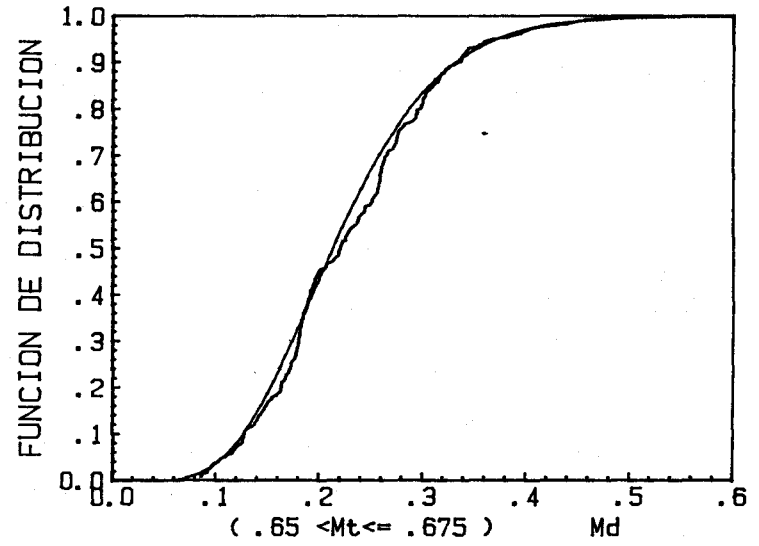
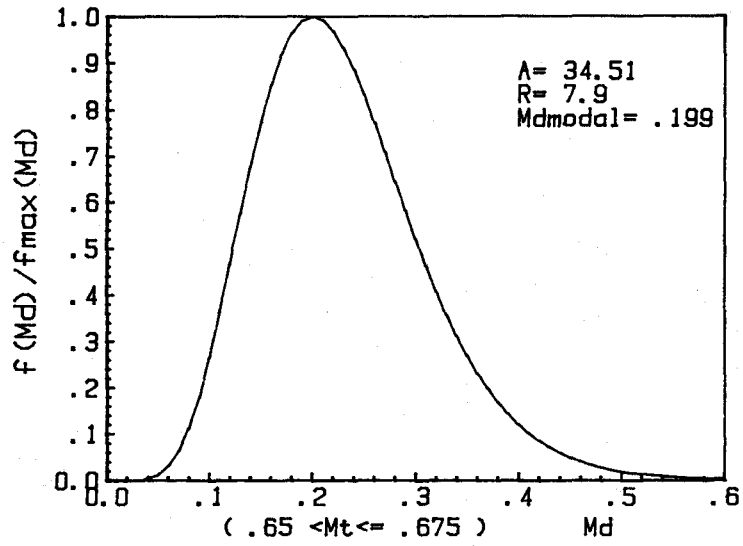


Fig. VI.23. Altura del sol 30°. Intervalo Mt 0.625 - 0.675.

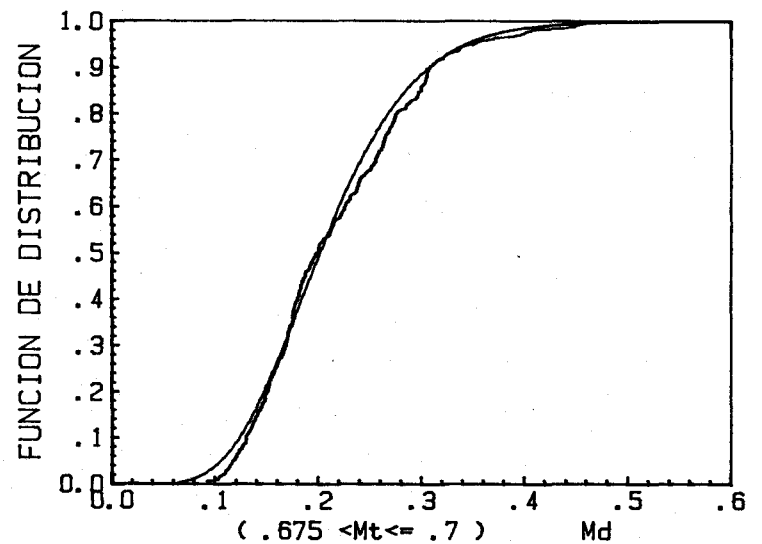
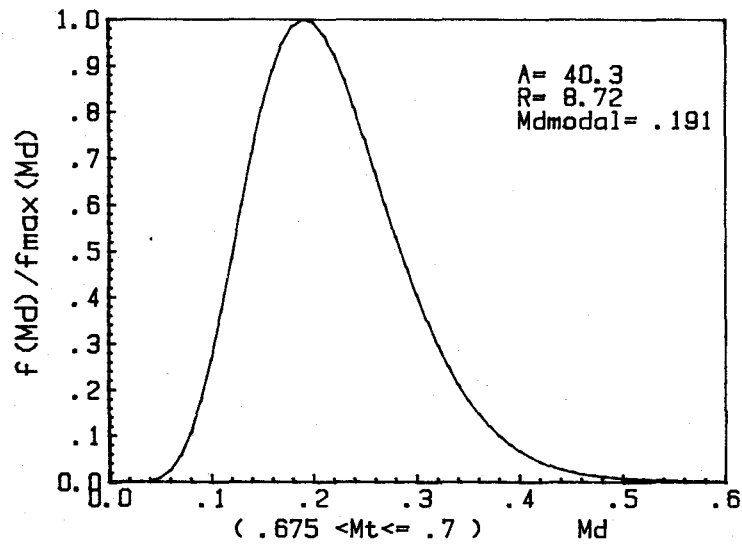
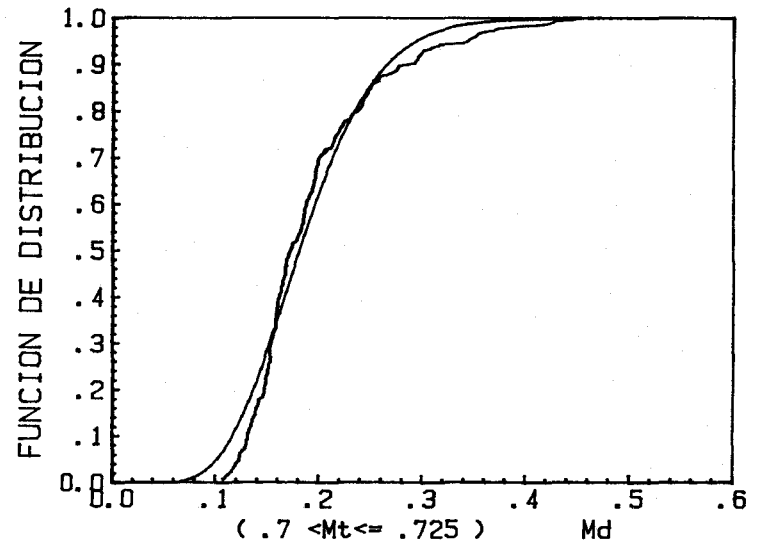
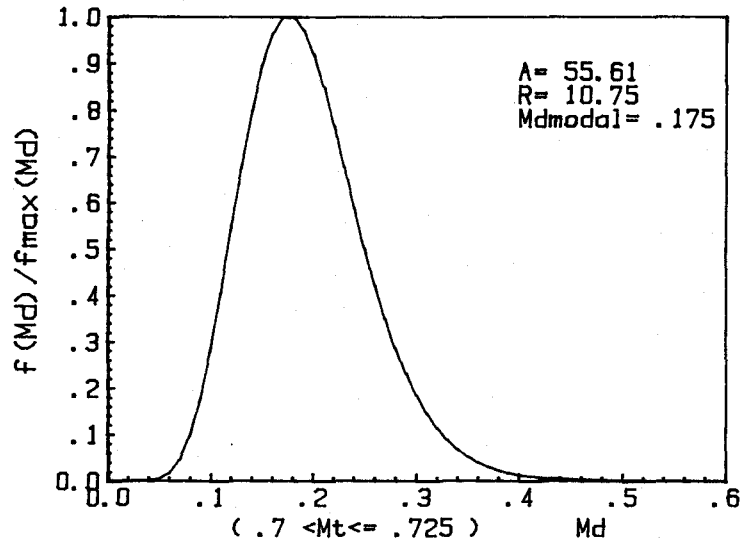


Fig. VI.24. Altura del sol 30°. Intervalo Mt 0.675 - 0.725.

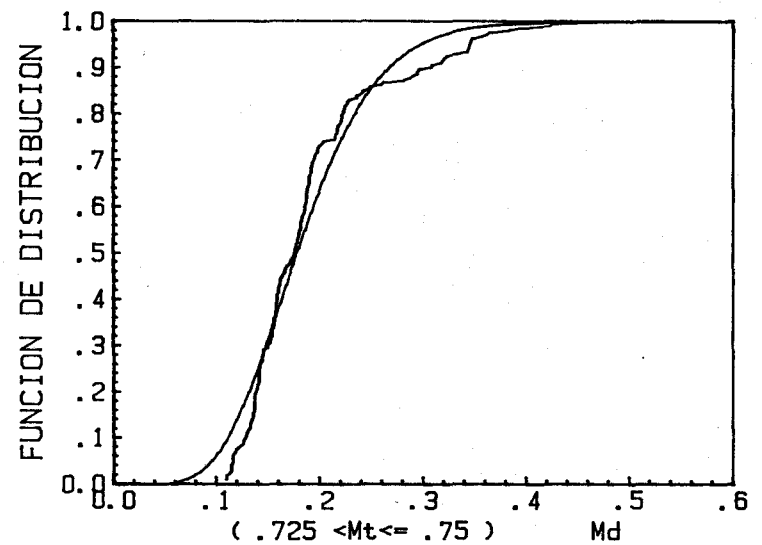
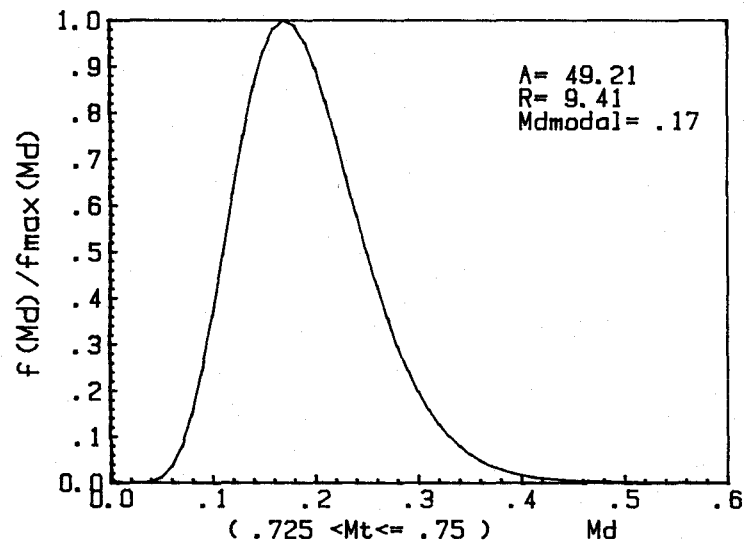
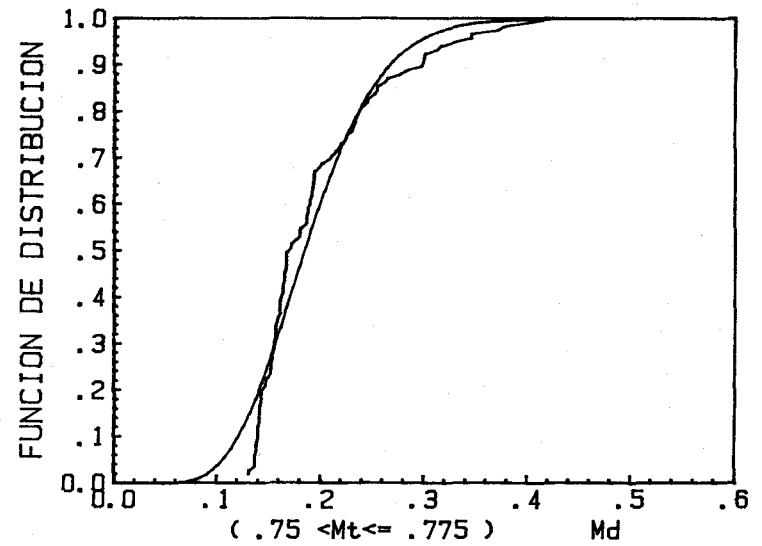
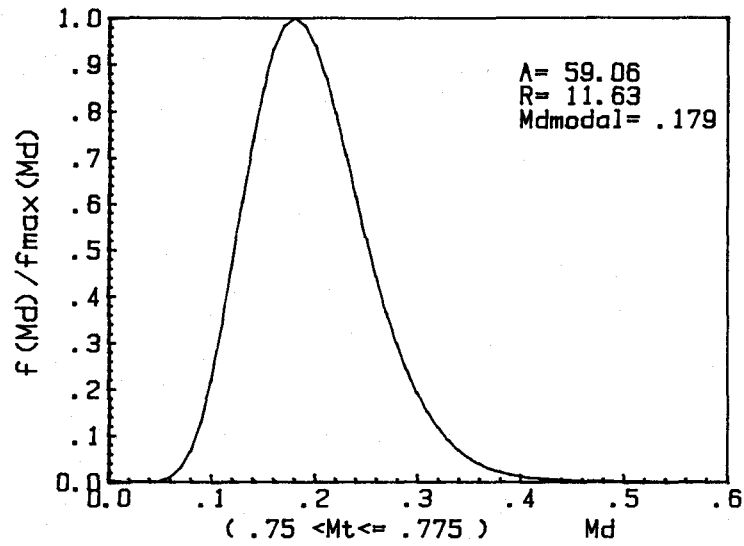


Fig. VI.25. Altura del sol 30°. Intervalo Mt 0.725 - 0.775.

La Fig. VI. 26. muestra como varían las funciones de densidad γ para diversos intervalos de M_t en función del parámetro M_d , correspondiente a la altura del sol de 30 grados, obtenidas mediante las técnicas de ajuste mencionadas en el apartado VI.5 a los datos experimentales tomados en la estación de medida descrita en el capítulo III.

Se observa en esta figura cómo a medida que aumenta la radiación global, es decir, a medida que M_t se hace mayor, M_d se va haciendo inferior, obteniéndose una menor componente de la radiación difusa. Al llegar a un cierto valor de M_t , que es variable para cada altura del sol estudiada, la componente difusa de la radiación aumenta muy ligeramente.

El valor máximo de la componente difusa de la radiación, para la altura de 30 grados y con los datos medidos, se obtiene para el intervalo de M_t comprendido entre 0.4 y 0.45.

Por otra parte, en la Fig. VI.26 la curva "m" representa la proyección de los valores modales de cada banda M_t estudiada. Si se unen con un trazo discontinuo estos valores modales, se obtendría una curva muy parecida a las ya mostradas en los estudios realizados en el capítulo V, confirmando en cierta medida los resultados obtenidos por Iqbal, con la diferencia sustancial de que en las gráficas del capítulo V se toman valores medios por cada banda de M_t , en lugar de los valores modales y que como ya sabemos, existen diferencias significativas en ciertas bandas entre ambas magnitudes.

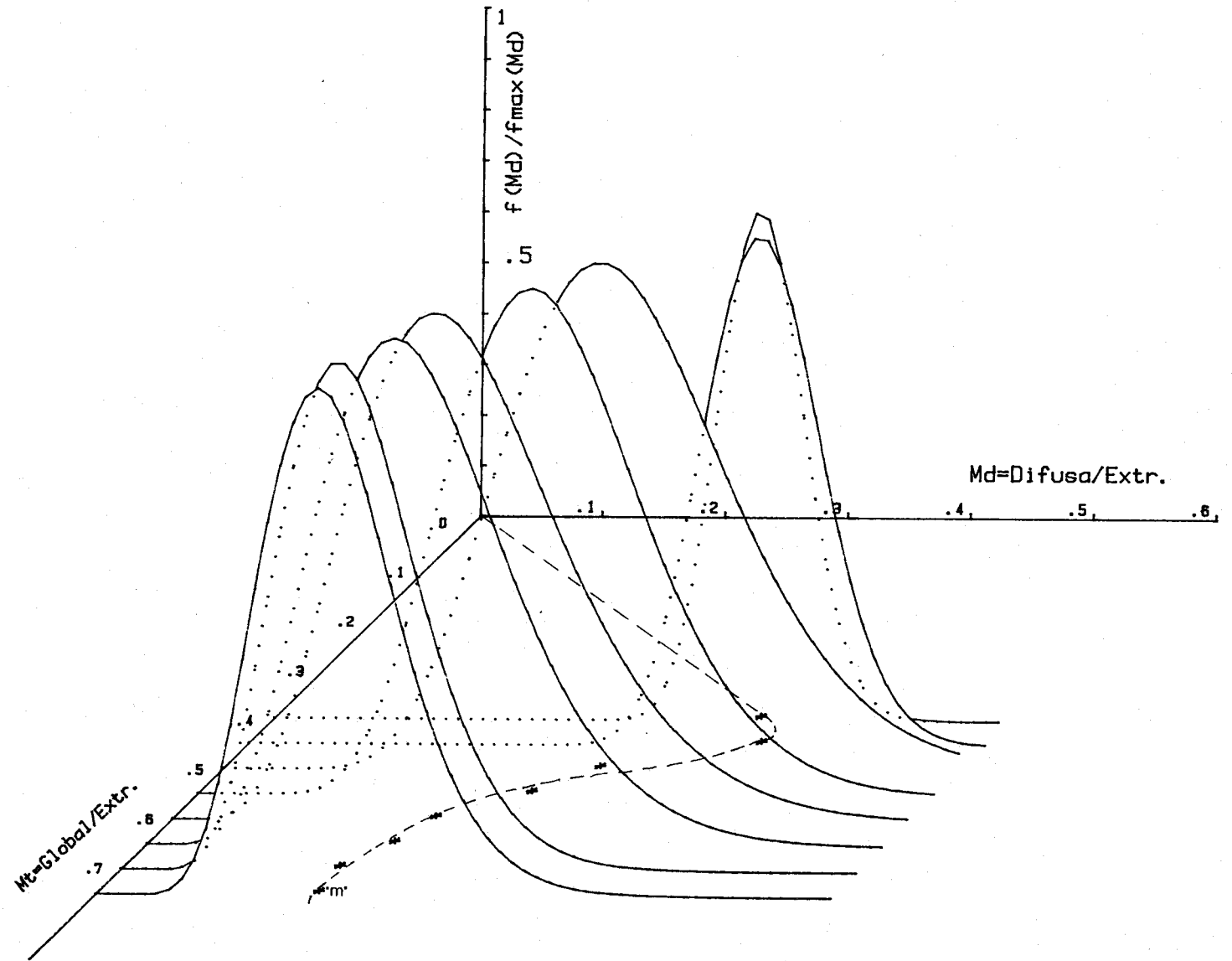


Fig. VI.26. Función densidad gamma para diversos intervalos de Mt y altura del sol 30° .

VI.6.2.- Estudio de las distribuciones para altura 40°.

Los resultados obtenidos pueden verse en la tabla VI.12, donde presentamos las bandas estudiadas, los valores de los parámetros A y R, el valor modal y el valor medio, así como el número de puntos ajustados por banda. Todos los ajustes han sido aceptables bajo el criterio de bondad de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de confianza del 95%.

TABLA VI.12. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALTURA DE 40°.

INTERVALO DE Mt	A	R	Md modal	$\bar{M}d$	Nº puntos
0.6 < Mt \leq 0.625	25.39	7.2	0.244	0.284	104
0.625 < Mt \leq 0.750	22.92	5.88	0.212	0.256	143
0.65 < Mt \leq 0.675	28.40	6.0	0.176	0.212	229
0.675 < Mt \leq 0.70	28.3	5.82	0.170	0.200	258
0.70 < Mt \leq 0.725	40.7	7.7	0.164	0.189	322
0.725 < Mt \leq 0.75	29.93	6.15	0.172	0.205	190
0.75 < Mt \leq 0.775	31.28	7.0	0.191	0.225	135

De otro lado, las figuras VI.27 a VI.30 muestran las funciones densidad gamma y las funciones de distribución teórica y experimental para cada banda estudiada.

De la tabla VI:12 se deduce que el valor de la radiación difusa va disminuyendo a medida que la radiación global va aumentando hasta un determinado nivel de radiación, a partir del cual comienza a aumentar. El valor mínimo de la componente difusa se dá en el intervalo de Mt comprendido entre 0.7 y 0.725, al cual le corresponde un valor de Md igual a 0.165.

Si en lugar de este valor modal, le asignamos a esta banda de M_t el valor medio, entonces M_d toma el valor 0.189, lo que representa una desviación respecto al valor modal de un 14.5%

De las funciones de distribución representadas junto a las funciones densidad para cada banda, podemos obtener la probabilidad con que se dá un valor de difusa igual o inferior a M_d , para el intervalo M_t estudiado. También obtenemos la probabilidad de que en un intervalo M_t se dé un determinado intervalo de M_d .

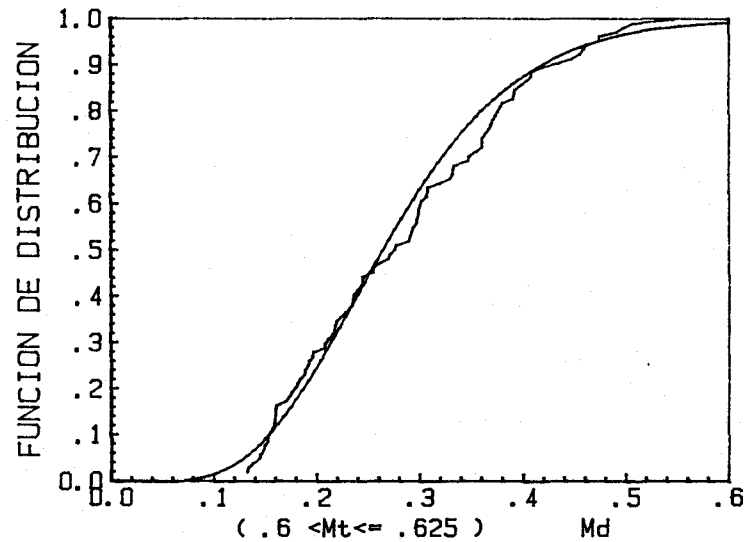
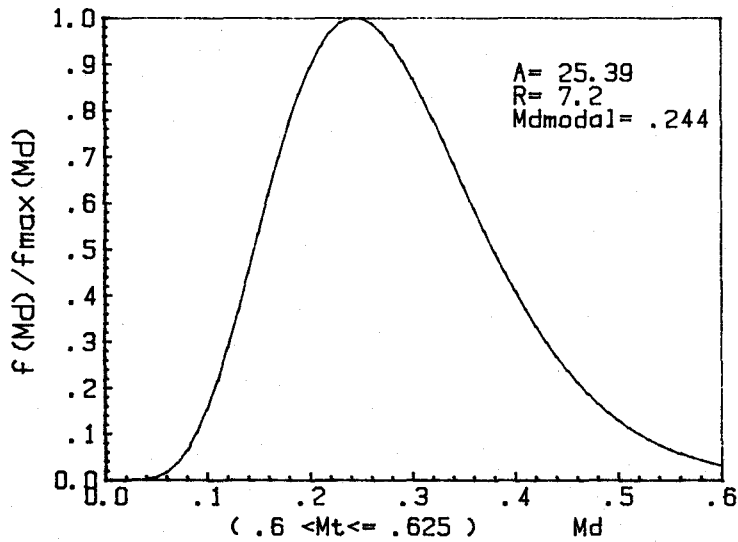
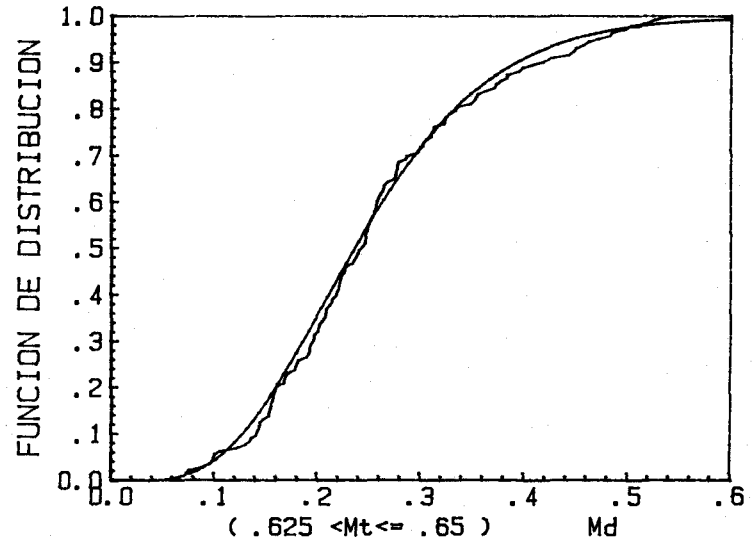
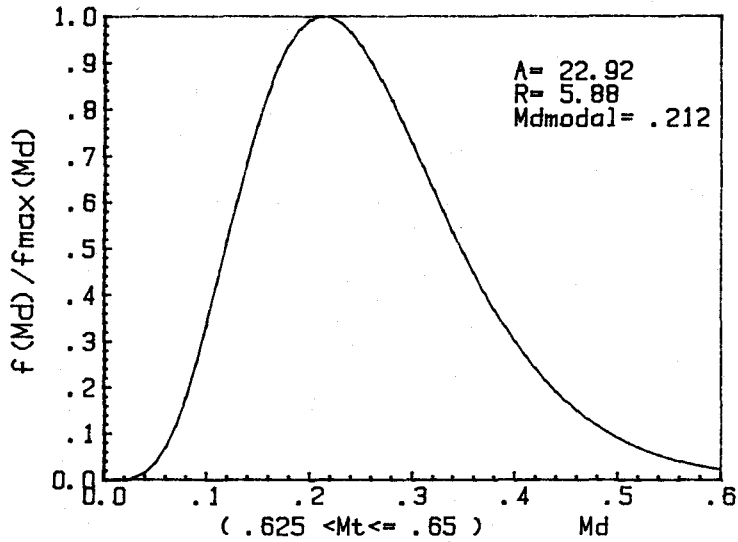


Fig. VI.27 Altura del sol 40 grados. Intervalo Mt 0.6-0.65.

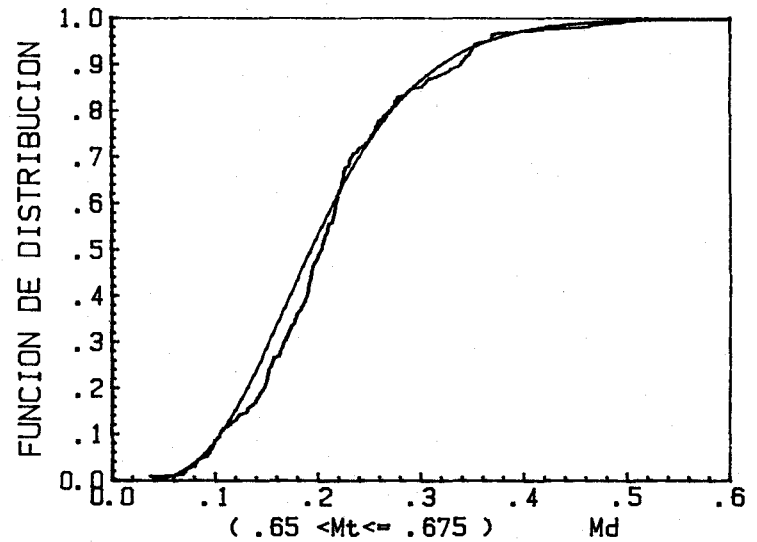
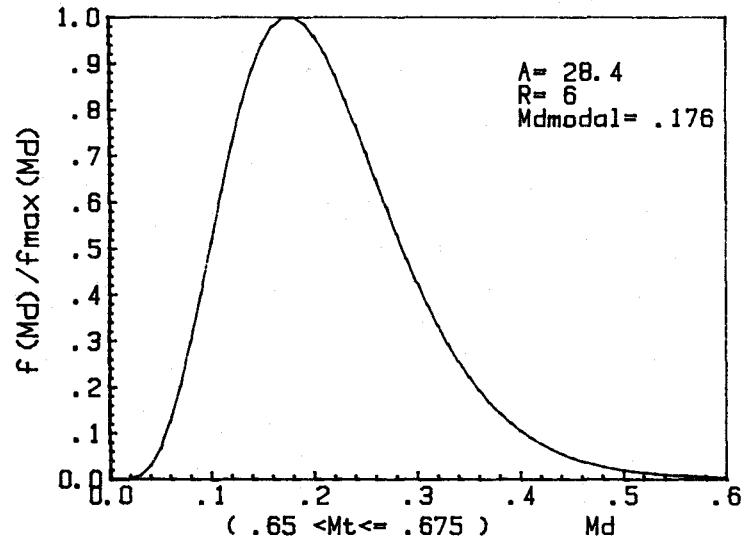
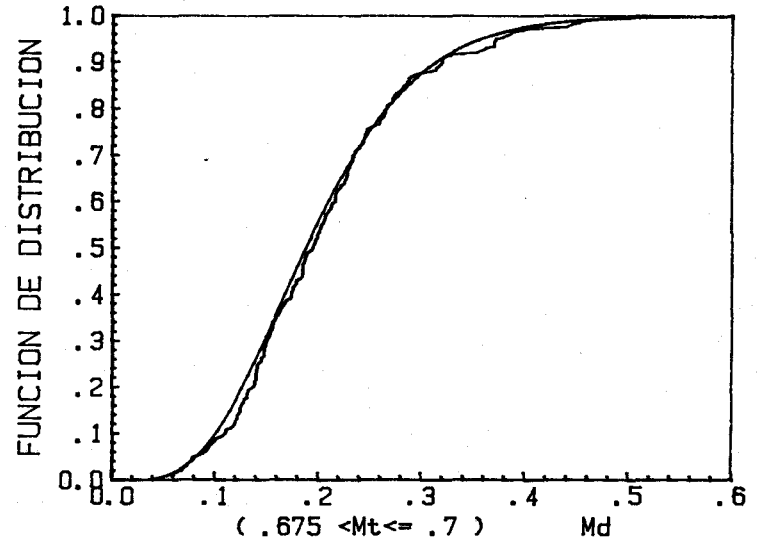
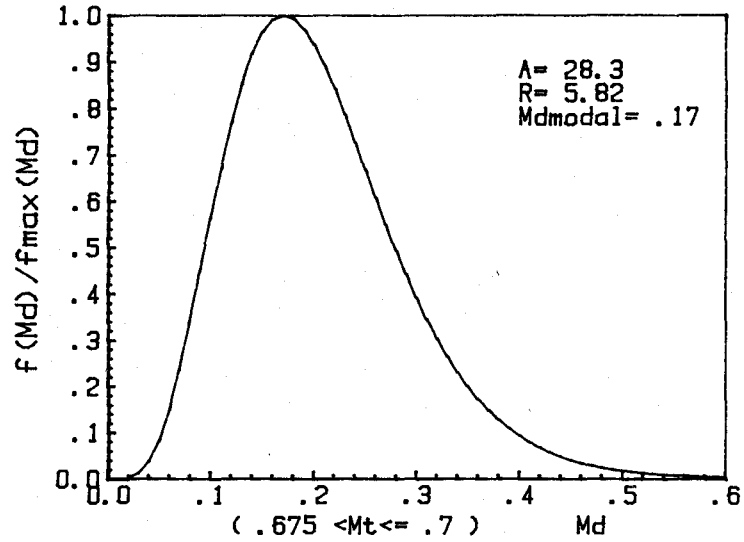


Fig. VI.28 Altura del sol 40 grados. Intervalo Mt 0.65-0.7.

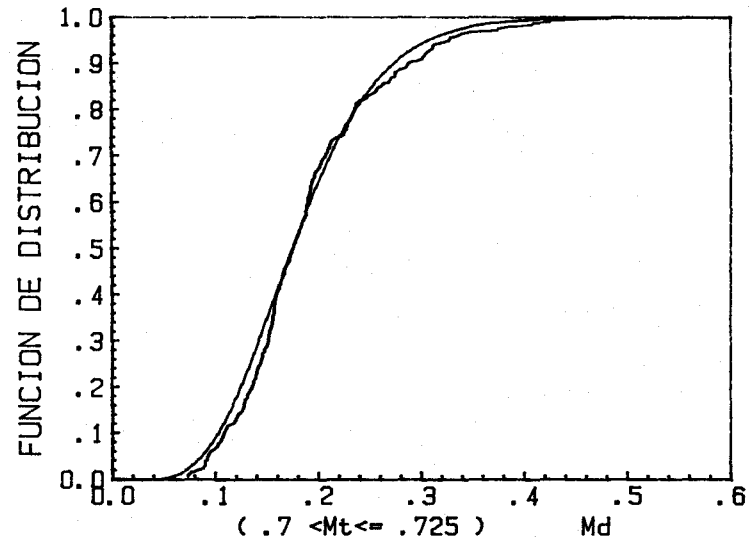
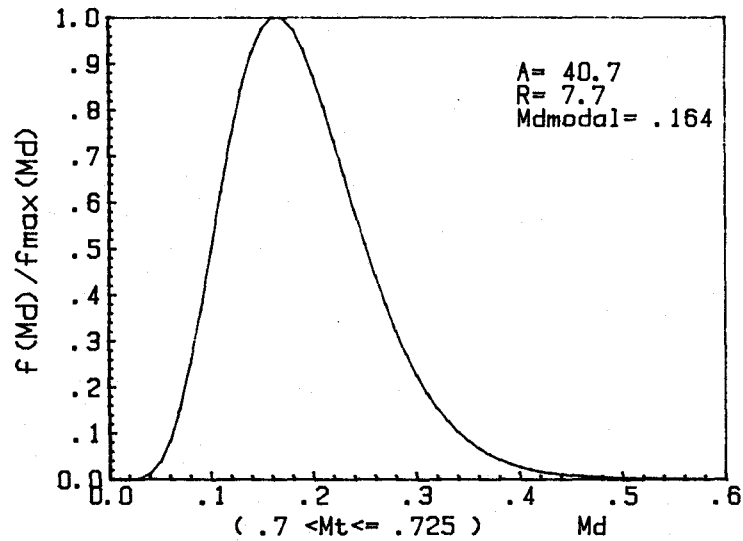
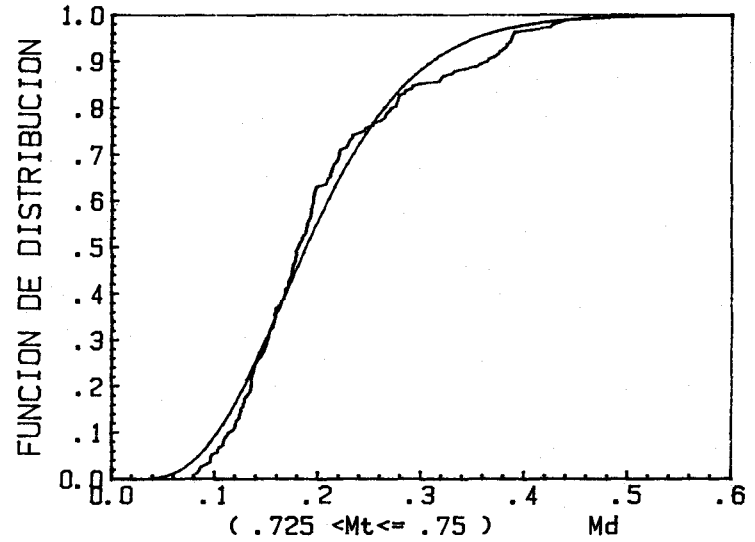
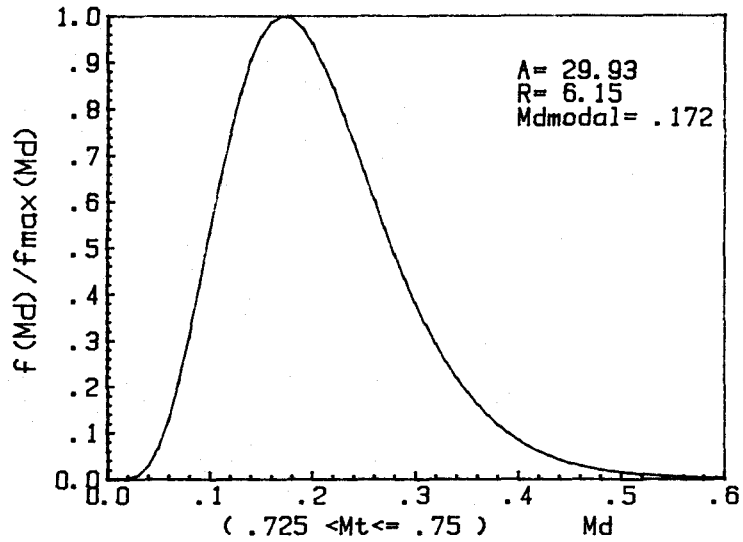


Fig. VI.29. Altura del sol 40 grados. Intervalo Mt 0.7-0.75.

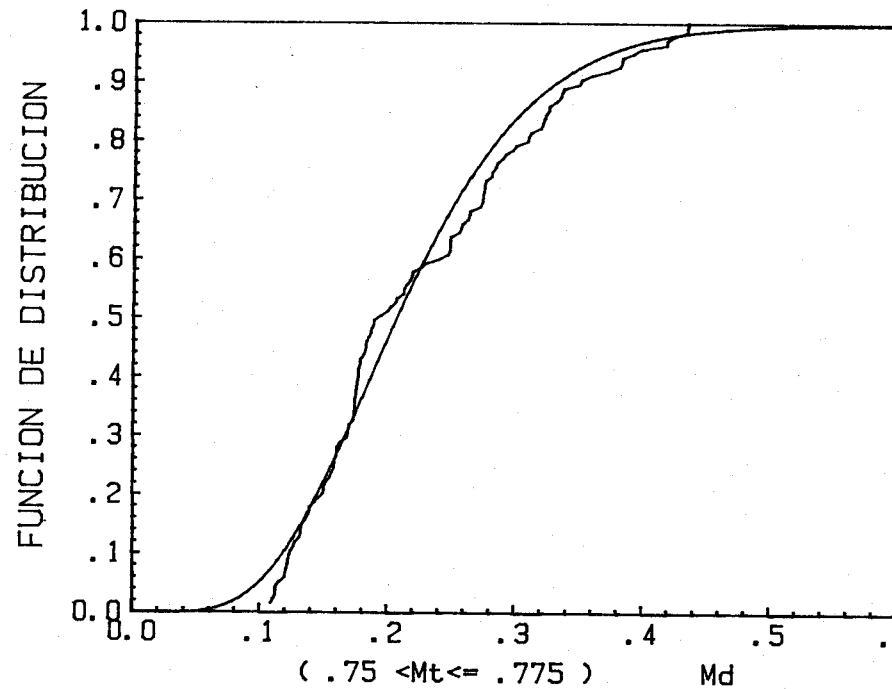
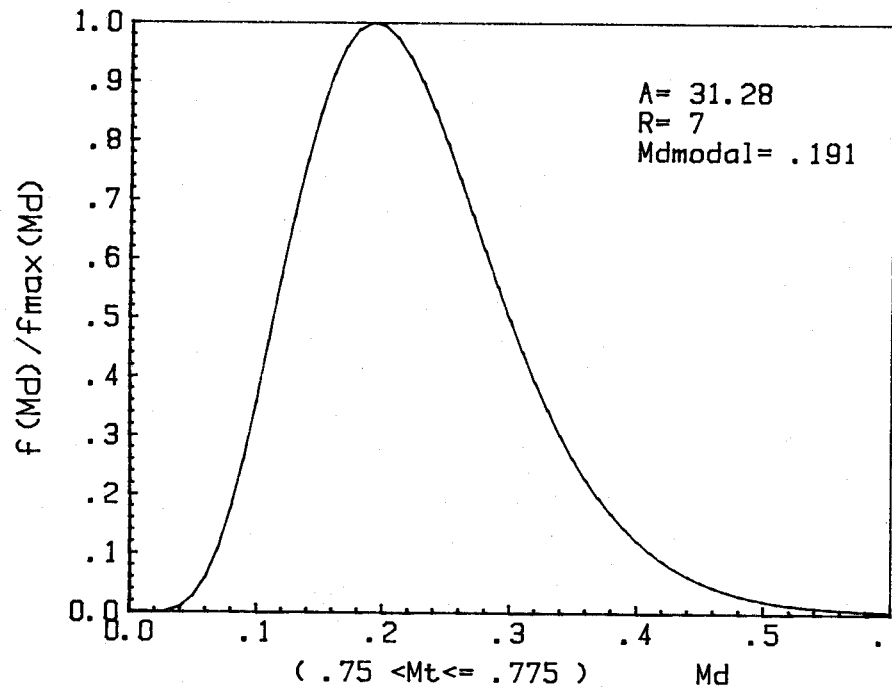


Fig. VI.30 Altura del sol 40 grados. Intervalo Mt 0.75-0.775.

VI.6.3.- Estudio de las distribuciones para altura 50°.

De forma análoga a la altura de 40° se presentan aquí los resultados obtenidos para la altura de 50°. Pueden verse en la tabla VI.13.

TABLA VI.13. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALTURA DE 50°.

INTERVALO DE Mt	A	R	Md modal	$\bar{M}d$	Nº puntos
0.6 < Mt \leq 0.625	19	5.4	0.231	0.284	61
0.625 < Mt \leq 0.65	35.13	8.1	0.202	0.230	107
0.65 < Mt \leq 0.675	31.56	6.61	0.177	0.209	170
0.675 < Mt \leq 0.70	30	5.55	0.151	0.184	233
0.70 < Mt \leq 0.725	31.45	5.62	0.146	0.178	299
0.725 < Mt \leq 0.75	32.41	5	0.123	0.155	225
0.75 < Mt \leq 0.775	28.3	5.13	0.145	0.181	94

Todos los ajustes han sido aceptables bajo el criterio de bondad de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de confianza del 95%.

Se observa en la tabla VI.13 un resultado semejante al obtenido para las elevaciones anteriores, esto es, un descenso del nivel de radiación difusa conforme aumenta la radiación global, hasta un cierto valor de Mt que suele estar muy próximo en todos los casos estudiados al valor 0.72.

También es destacable las diferencias sustanciales que existen entre los valores modales y los valores medios de radiación difusa para una determinada banda de radiación global. En concreto, para la banda 0.725, 075, el valor modal de Md

es 0.124, cuando su valor medio es de 0.155, lo que representa una desviación del 25% respecto al valor modal. Este resultado es altamente significativo.

Las figuras VI.31 a VI. 34 muestran las funciones densidad - gamma y las funciones de distribución teórica y experimental para cada banda estudiada.

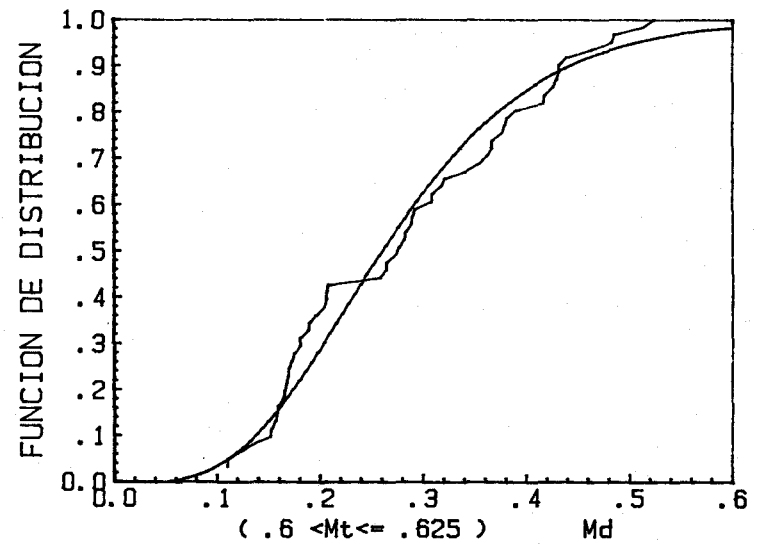
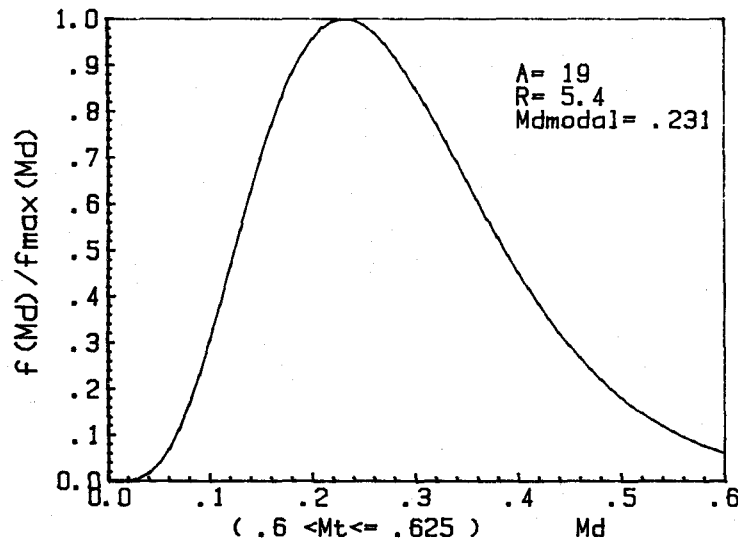
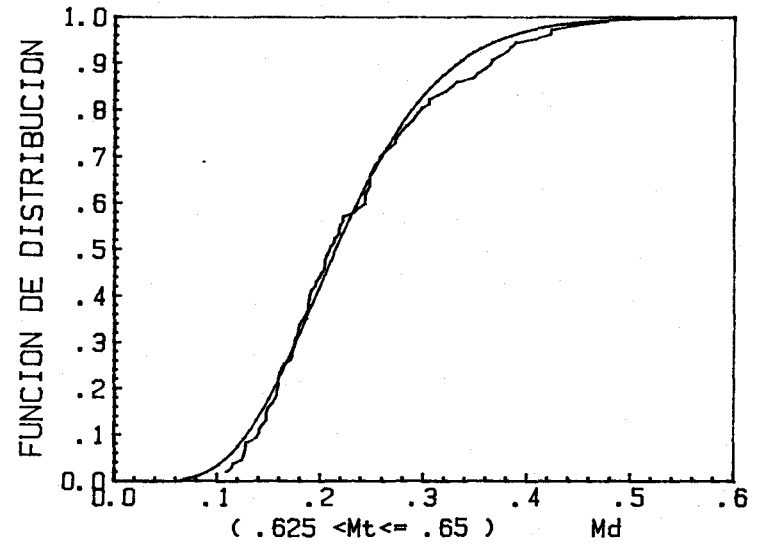
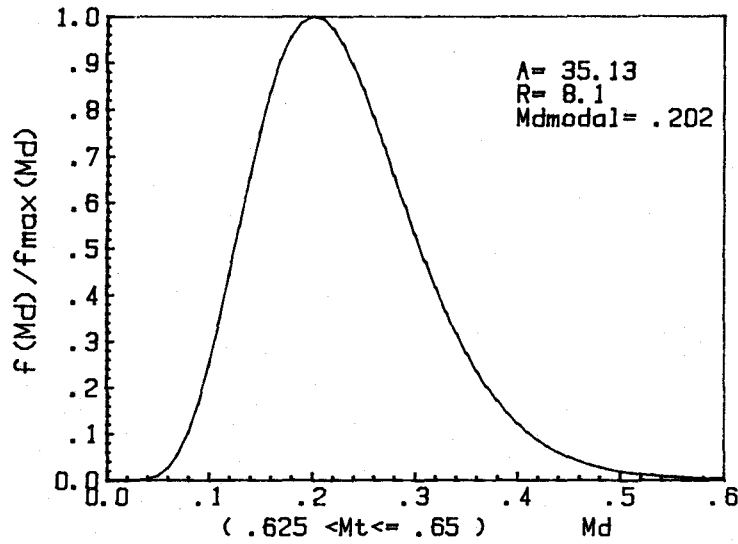


Fig.VI.31 Altura del sol 50 grados. Intervalo Mt 0.6-0.65.

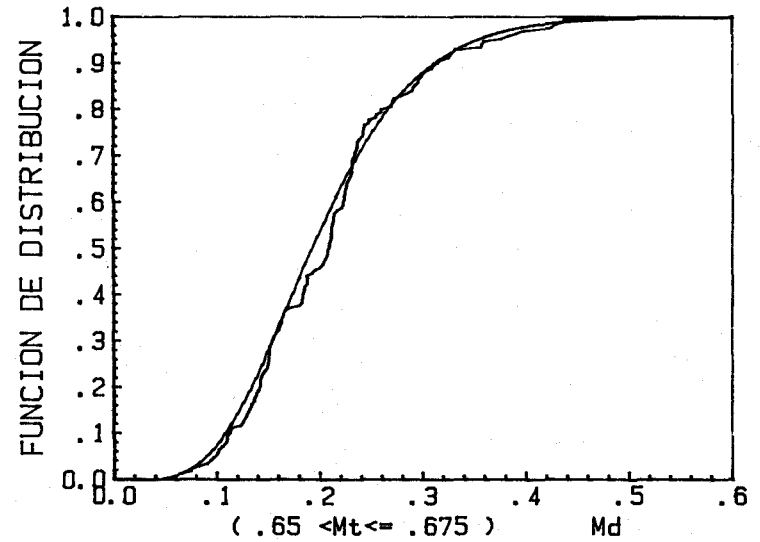
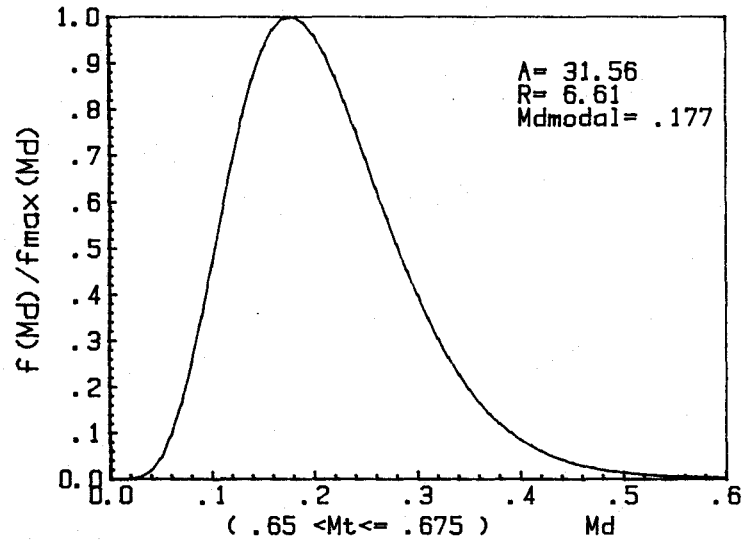
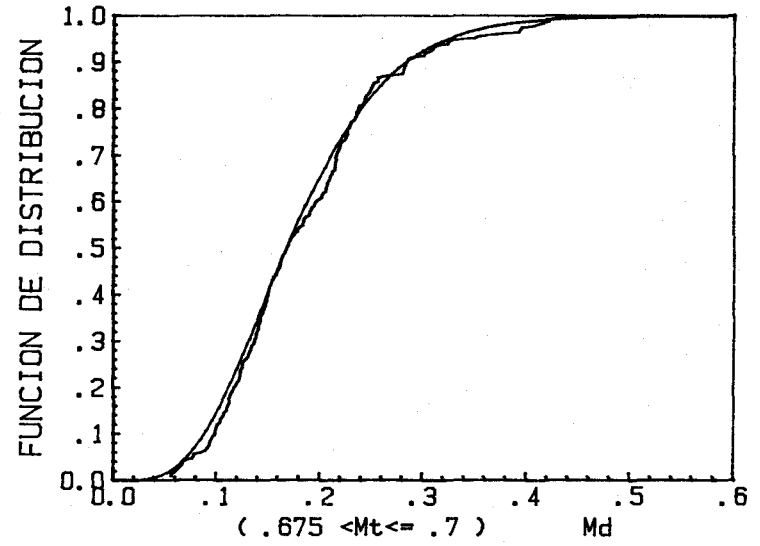
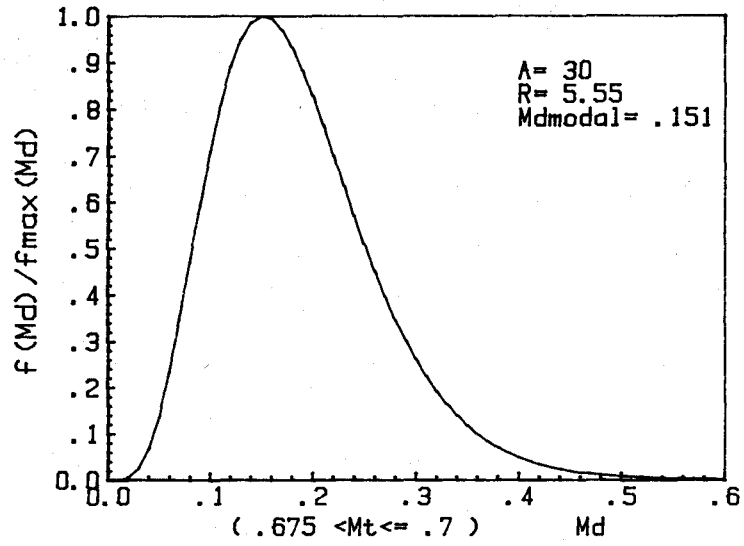


Fig. VI.32 Altura del sol 50 grados. Intervalo Mt 0.65-0.7.

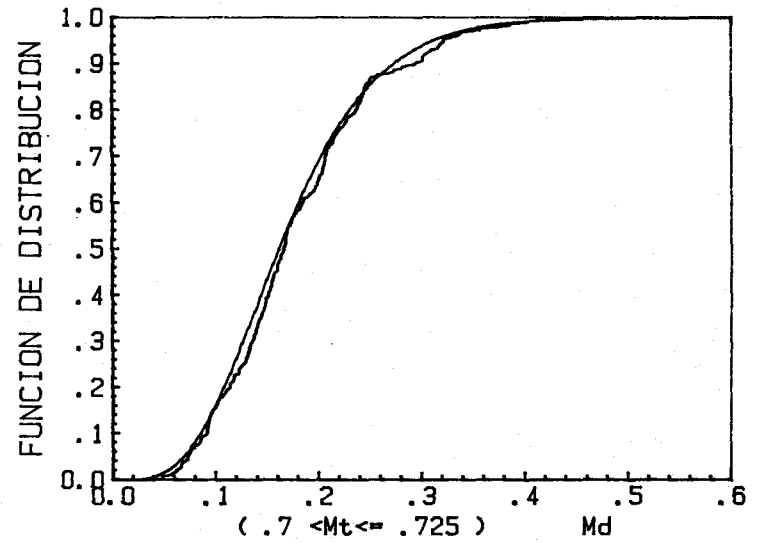
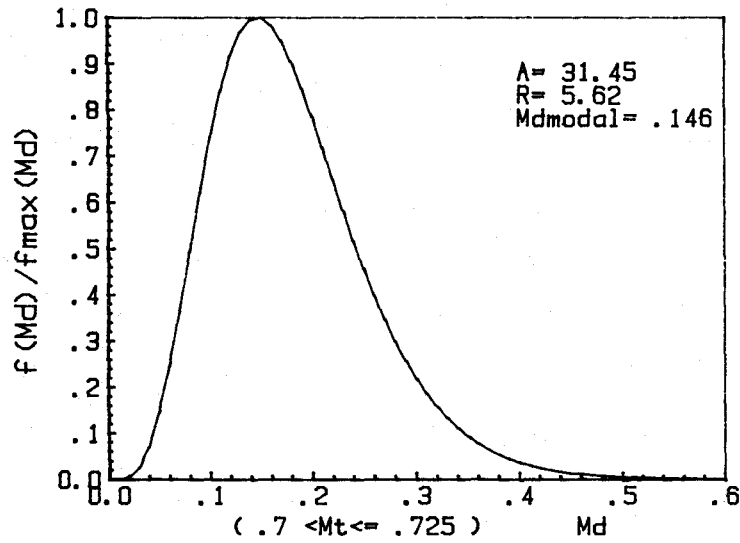
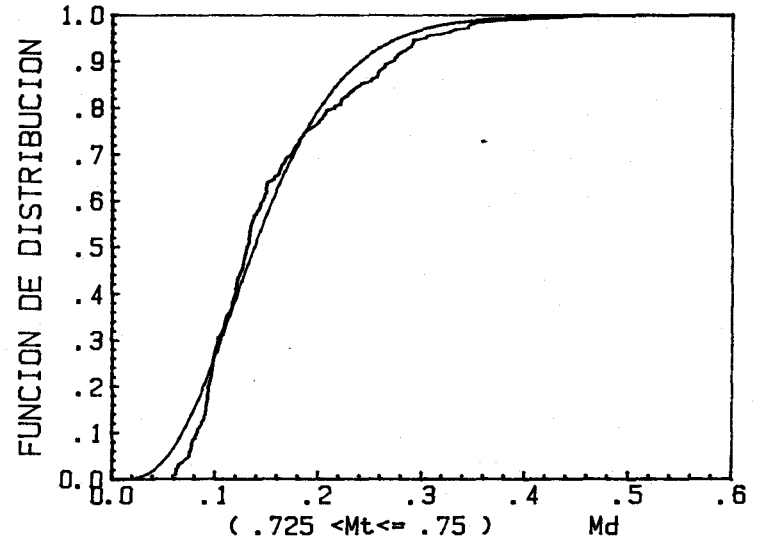
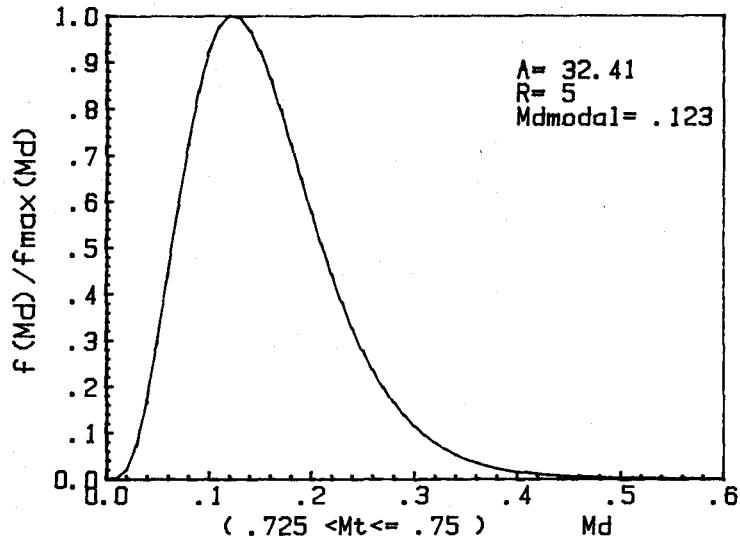


Fig. VI.33. Altura del sol 50 grados. Intervalo Mt 0.7-0.75.

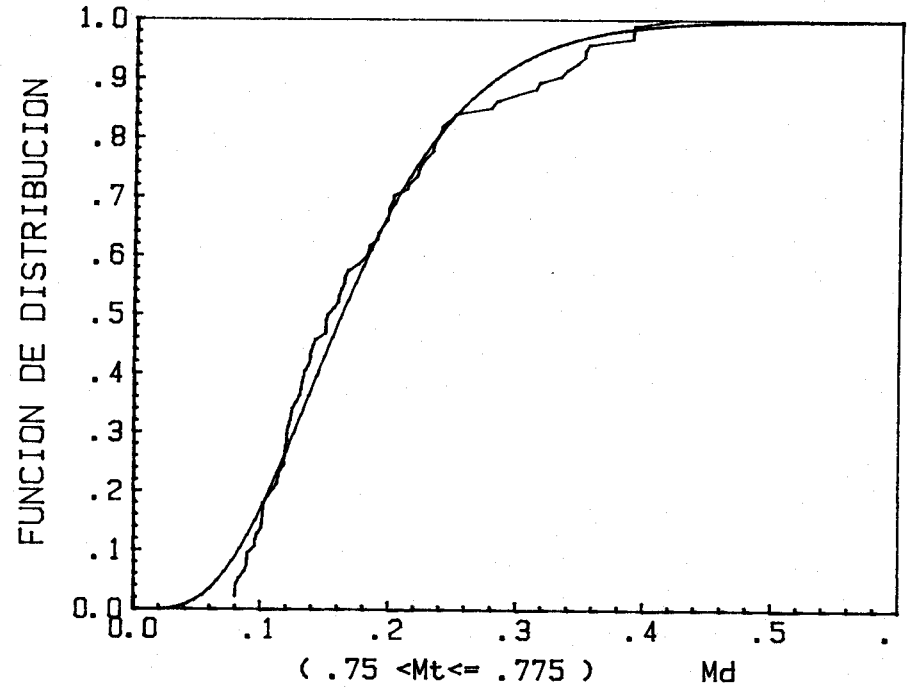
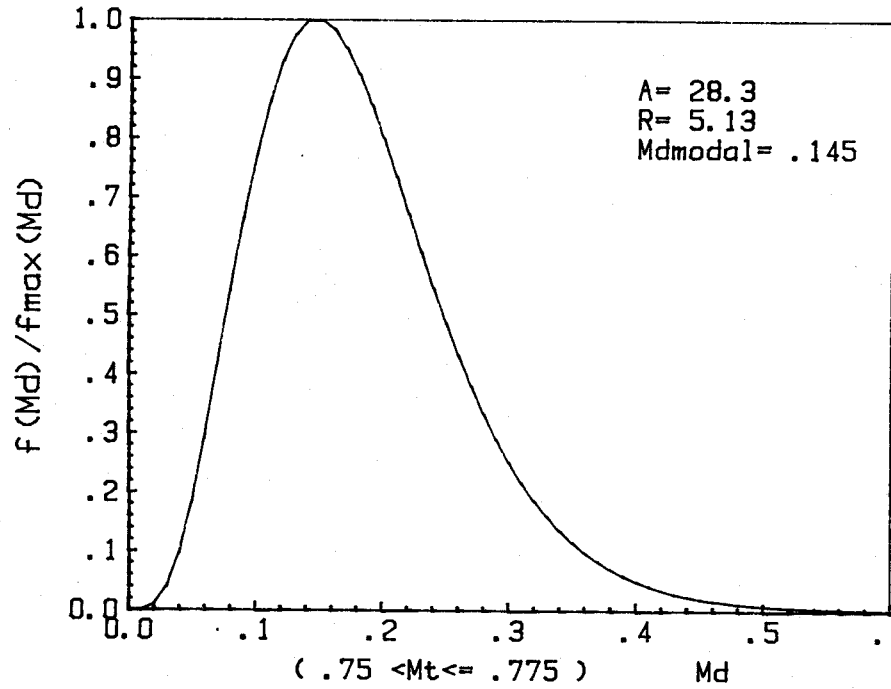


Fig. VI.34. altura del sol 50 grados. Intervalo Mt 0.75-0.775.

VI.6.4.- Estudio de las distribuciones para altura 60°.

En la tabla VI.14 se dan los resultados obtenidos para una elevación del sol a 60 grados.

TABLA VI.14. RESULTADOS OBTENDIDOS PARA LA ALTURA DE 60°.

INTERVALO DE Mt	A	R	Md modal	$\bar{M}d$	Nº de puntos
0.65 < Mt ≤ 0.675	32	7	0.187	0.22	110
0.675 < Mt ≤ 0.70	30.16	5.45	0.147	0.18	161
0.70 < Mt ≤ 0.725	28.8	4.73	0.129	0.164	201
0.725 < Mt ≤ 0.75	23.29	3.73	0.117	0.160	217
0.75 < Mt ≤ 0.775	29.17	3.91	0.099	0.134	125

En esta altura hemos comenzado el estudio a partir de la banda correspondiente a Mt 0.65 porque no teníamos suficientes puntos para poder realizar los ajustes para valores inferiores.

Todos los ajustes han sido aceptables bajo el criterio de bondad Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de confianza del 95%.

Se observa de la tabla VI.14 como la radiación difusa decrece a medida que la radiación global aumenta y que no se produce como en los casos anteriormente analizados un aumento de difusa después de haber pasado por un nivel mínimo. También se detecta unas diferencias muy acusadas entre los valores modales y los medios, que como ocurre para el intervalo de Mt comprendido entre 0.725 y 0.75 llega ser de un 36.7% respecto del valor modal.

Las Figs. VI.35 a VI.37 muestran las funciones densidad γ y las funciones de distribución teórica y experimental para la altura 60°.

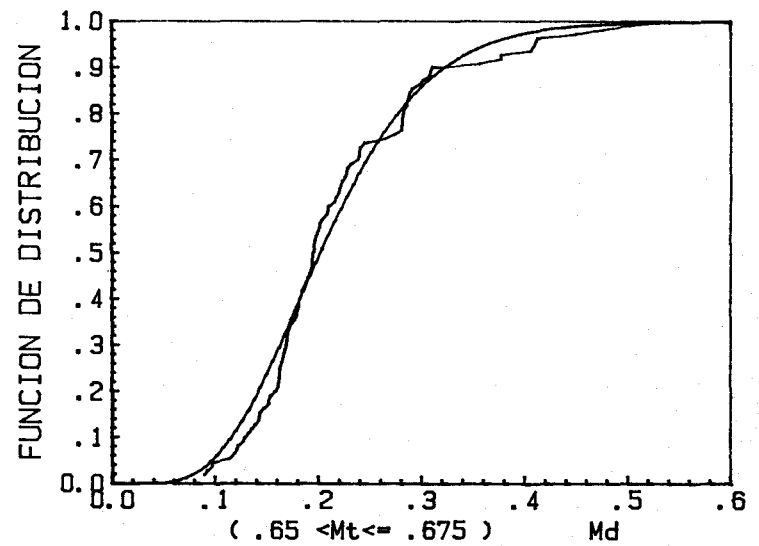
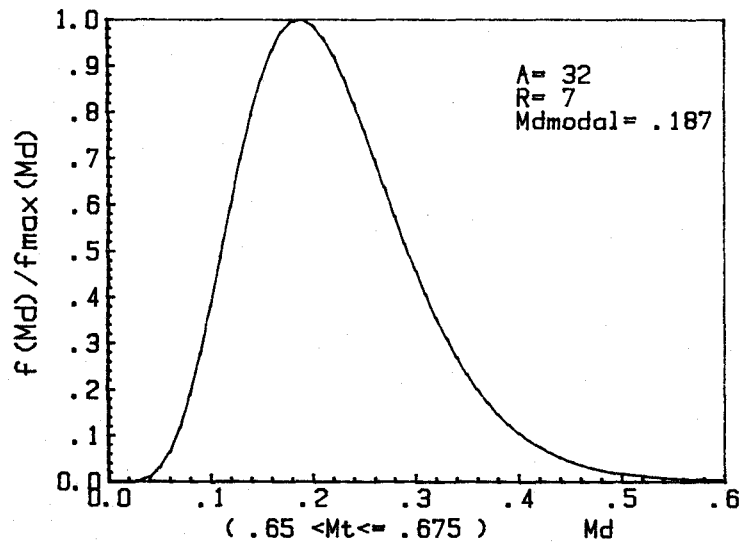
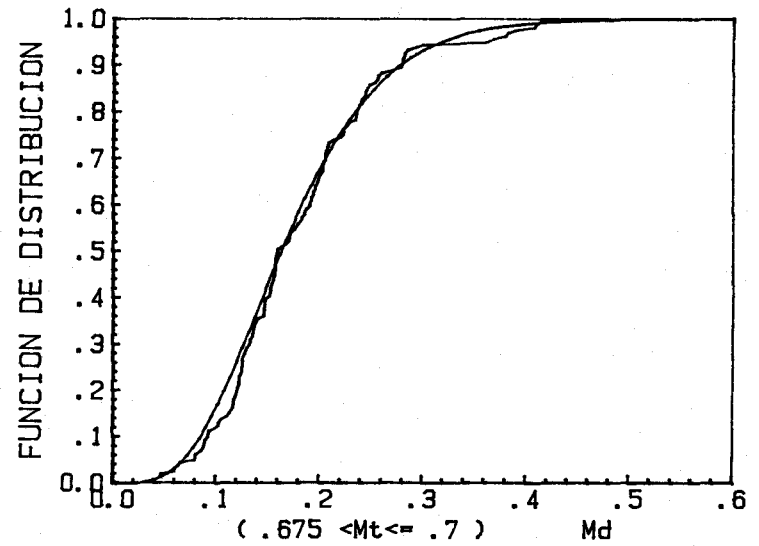
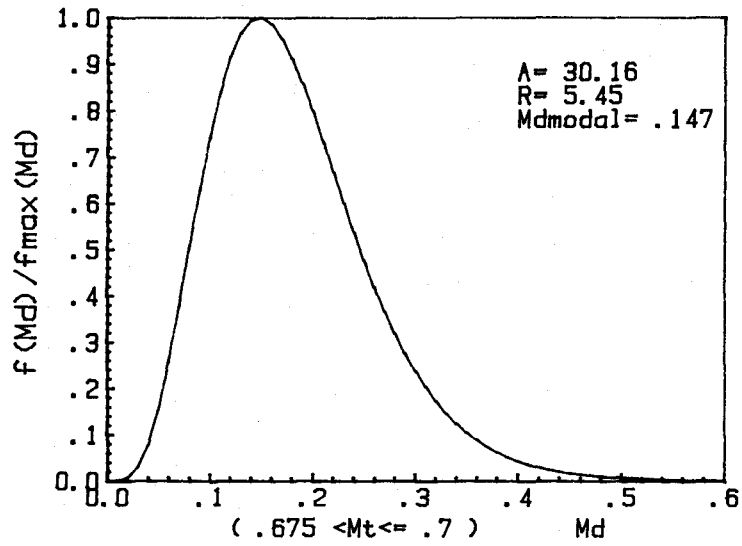


Fig. VI.35. Altura del sol 60 grados. Intervalo Mt 0.65-0.7.

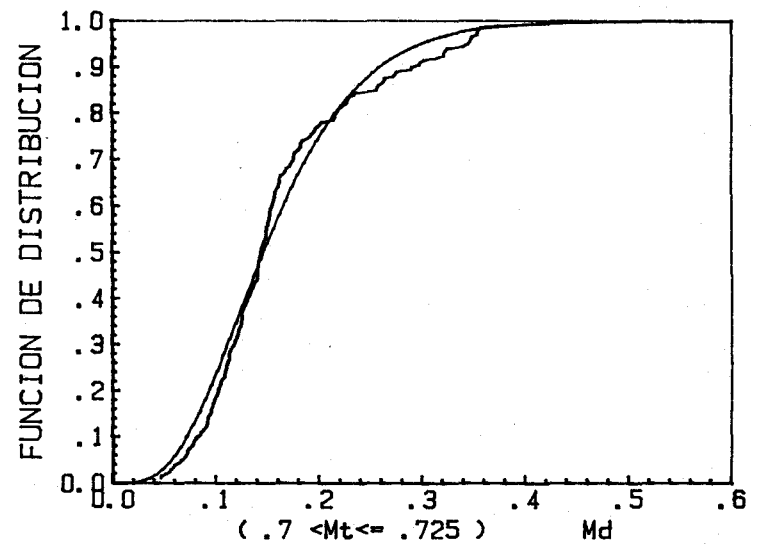
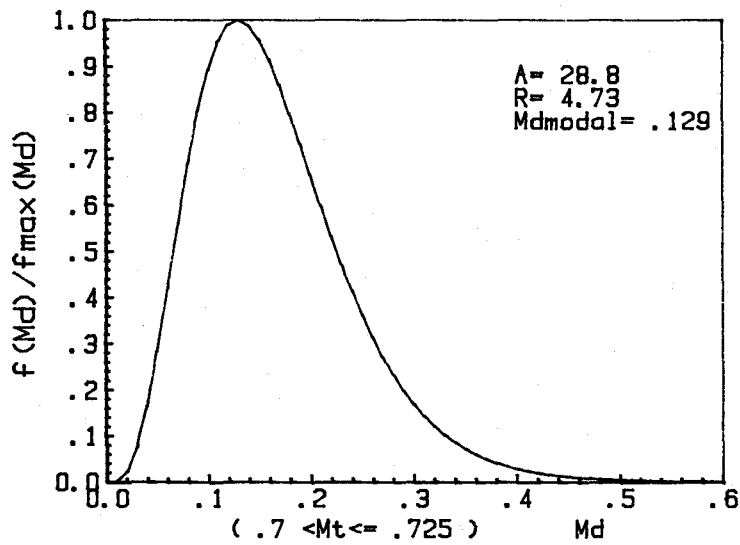
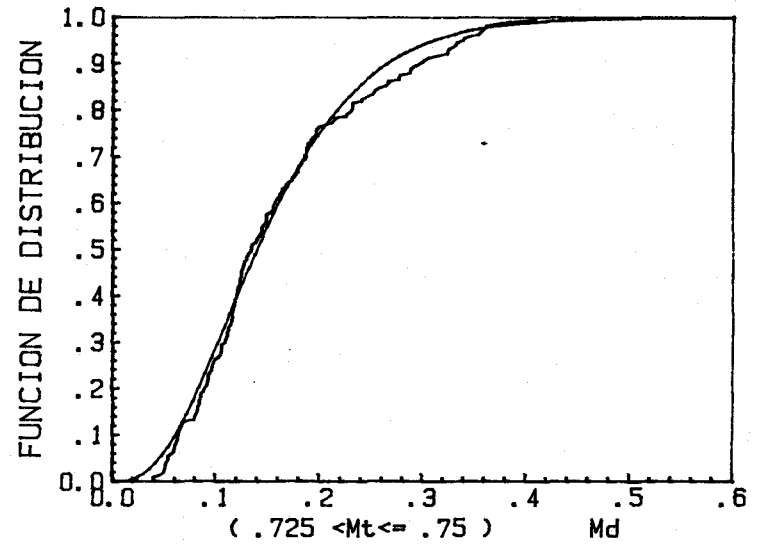
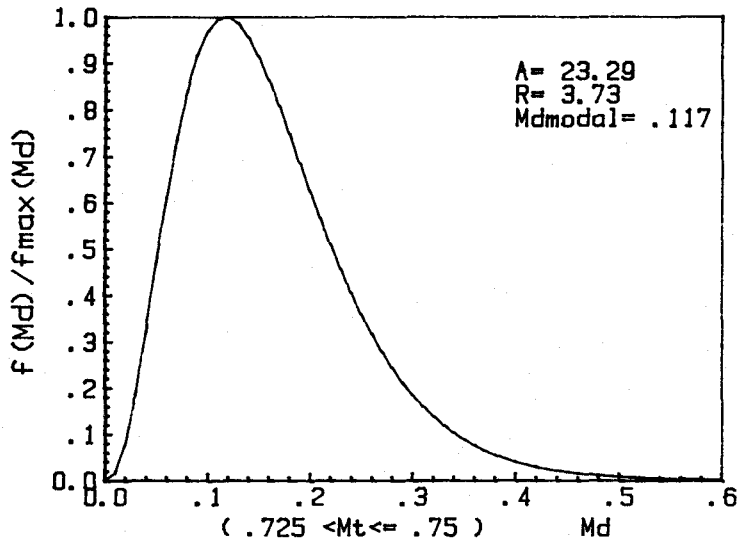


Fig. VI.36. Altura del sol 60 grados. Intervalo Mt 0.7-0.75.

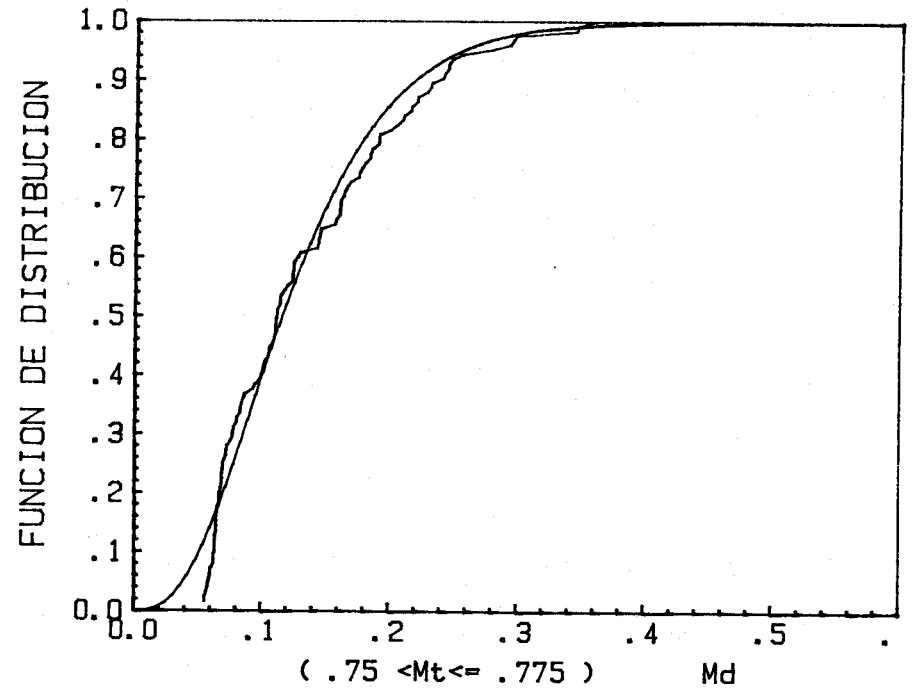
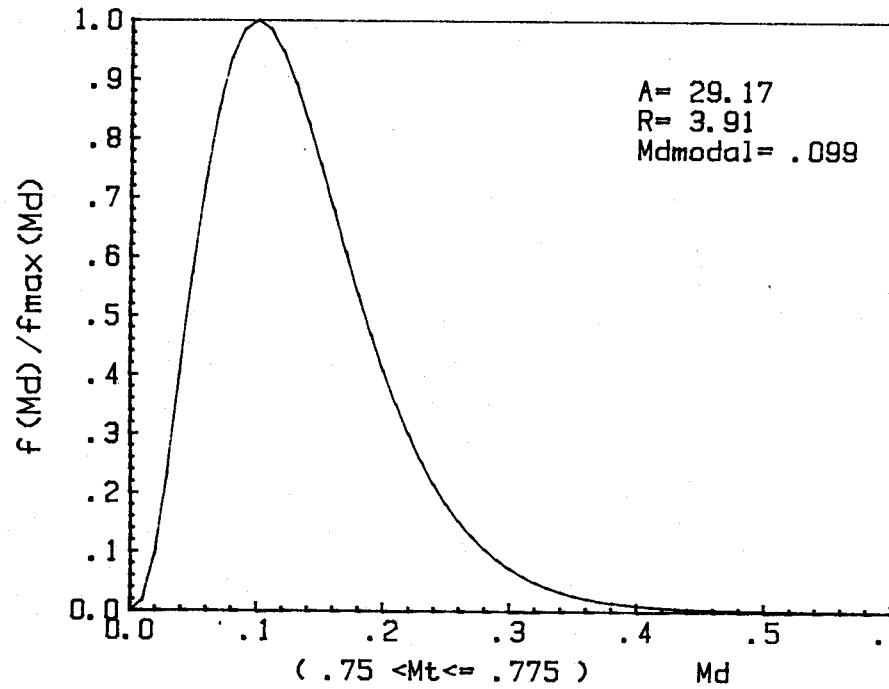


Fig. VI. 37, altura del sol 60 grados. Intervalo Mt 0.75-0.775.

VI.6.5.- Estudio de las distribuciones para altura 70º.

En la tabla VI.15 se muestran los resultados obtenidos para la elevación del sol correspondientes a 70 grados.

TABLA VI.15. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA ALTURA DE 70º.

INTERVALO DE Mt	A	R	Md modal	$\bar{M}d$	Nº puntos
0.65 < Mt \leq 0.675	31.93	7.60	0.206	0.238	49
0.675 < Mt \leq 0.70	32.11	5.59	0.142	0.174	131
0.70 < Mt \leq 0.725	24.86	3.70	0.108	0.148	184
0.725 < Mt \leq 0.75	32.24	4.98	0.121	0.154	200
0.75 < Mt \leq 0.775	32.88	5.95	0.150	0.181	132
0.775 < Mt \leq 0.80	51.82	8.95	0.153	0.172	55

Al igual que ocurría para 60 grados de elevación del sol, el estudio para 70 grados se ha comenzado a partir de Mt igual a 0.65, ya que no había suficientes puntos para los ajustes por bandas para valores de Mt inferiores a 0.65.

De nuevo observamos como los valores modales y medio son sustancialmente distintos. También se observa que para esta altura, los valores modales suelen ser muy bajos en comparación con las otras alturas, aunque algo diferente en relación a la altura de 60º. Todos los ajustes han sido aceptables, según el criterio de bondad de Kolmogorov-Smirnov para un nivel de confianza del 95%.

Las Figs. VI.38 a VI.40 muestran las funciones densidad γ y las funciones de distribución teórica y experimental, obtenidas para altura 70° .

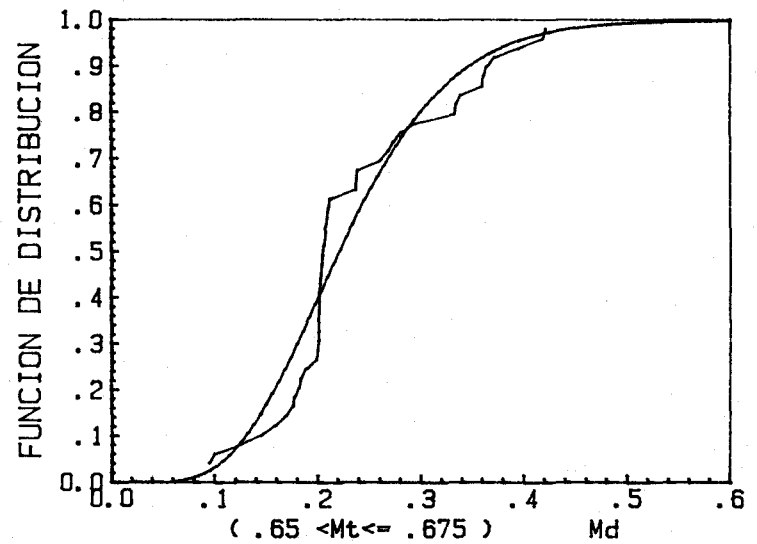
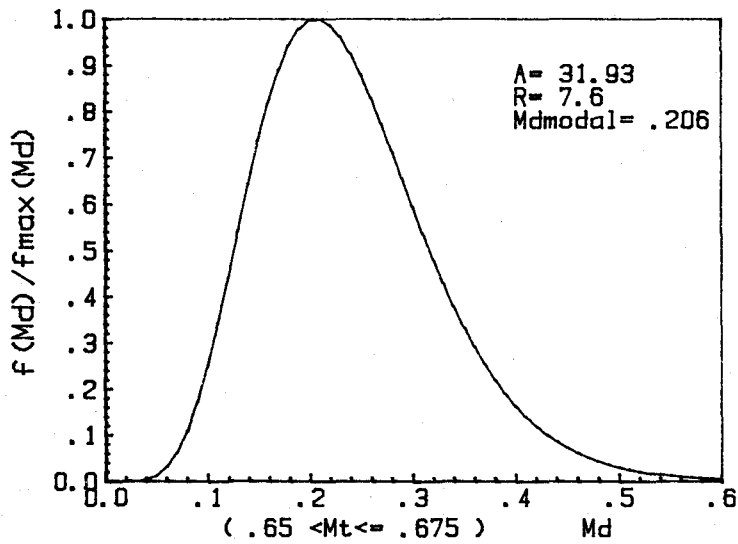
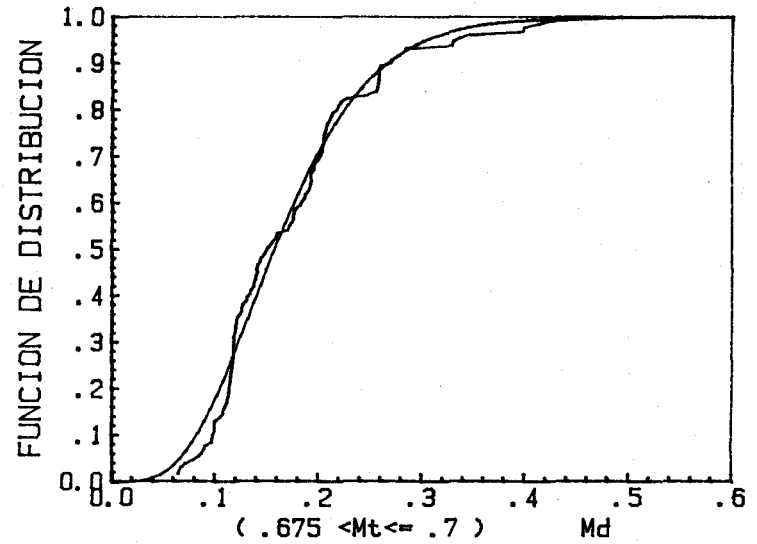
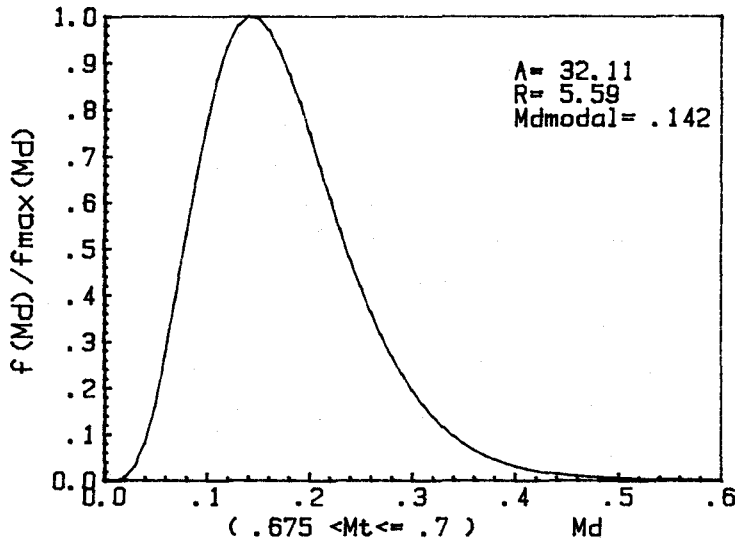


Fig. VI.38. Altura del sol 70 grados. Intervalo Mt 0.65-0.70.

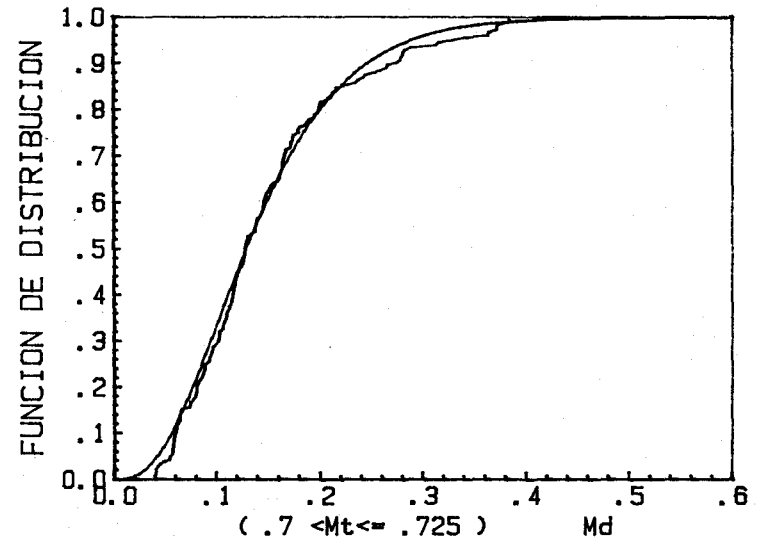
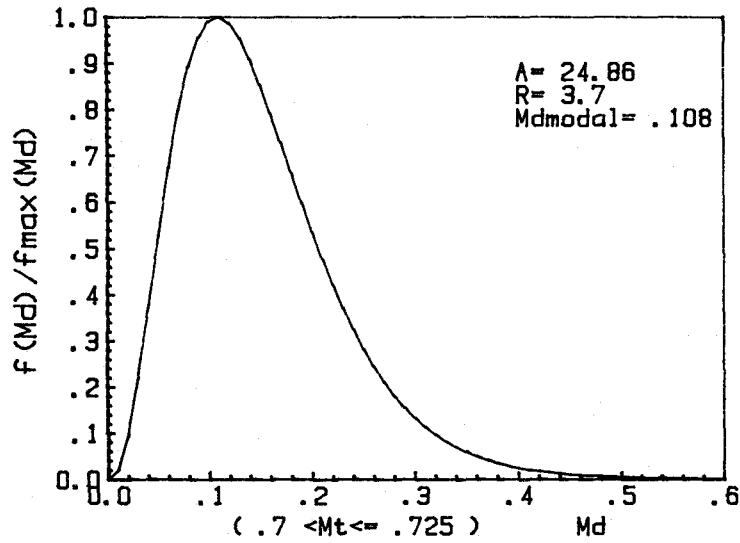
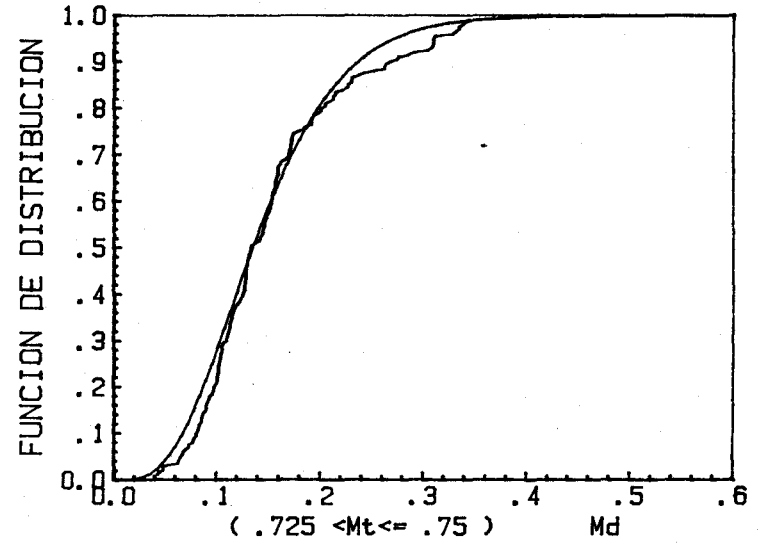
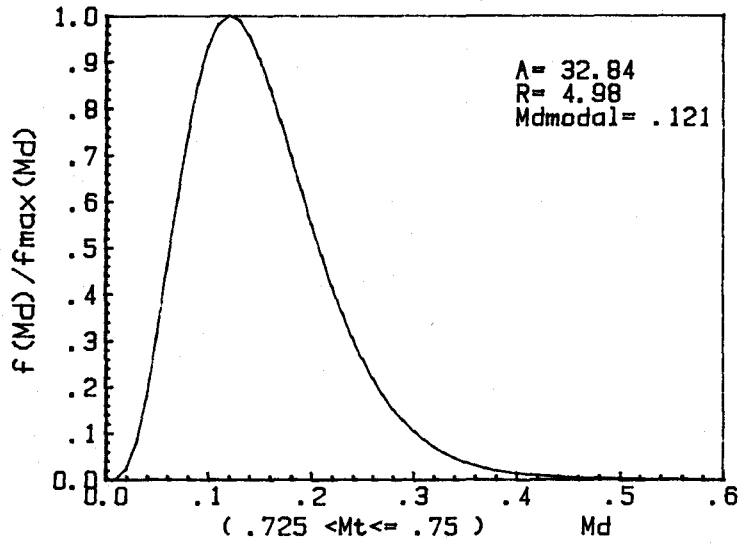


Fig. VI.39. Altura del sol 70 grados. Intervalo Mt 0.70-0.75.

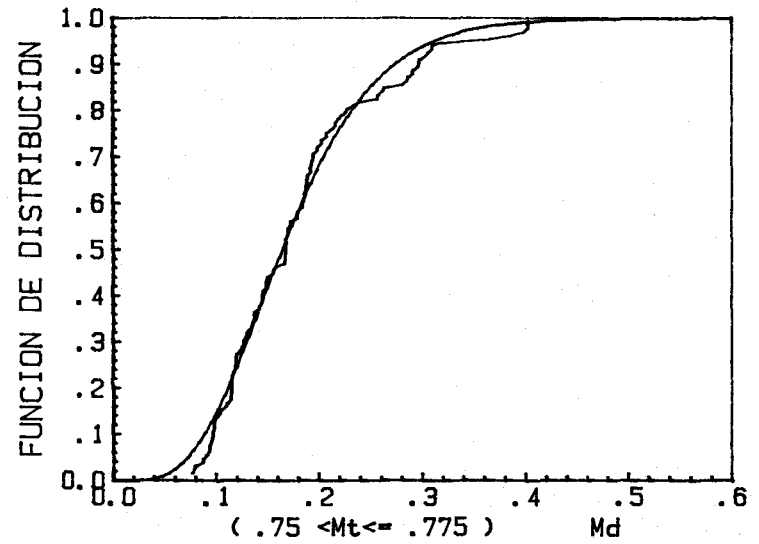
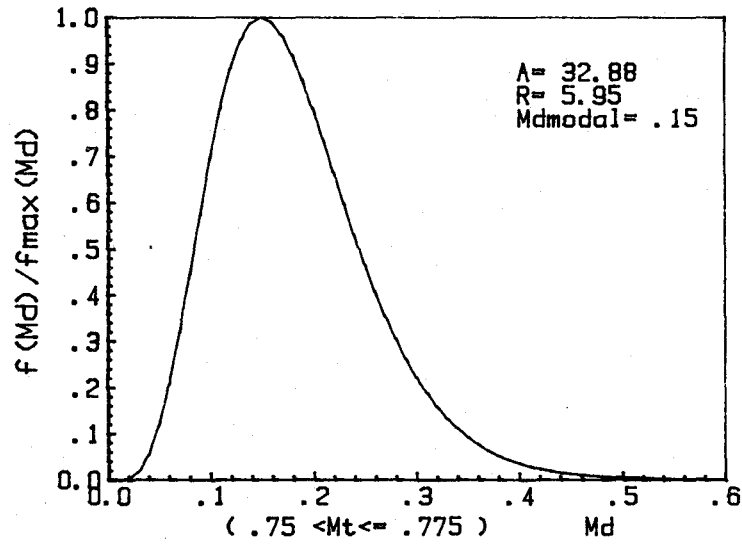
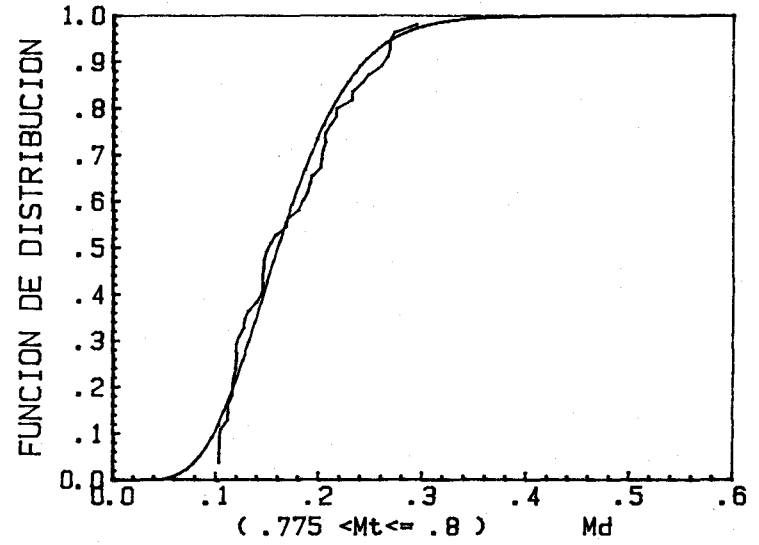
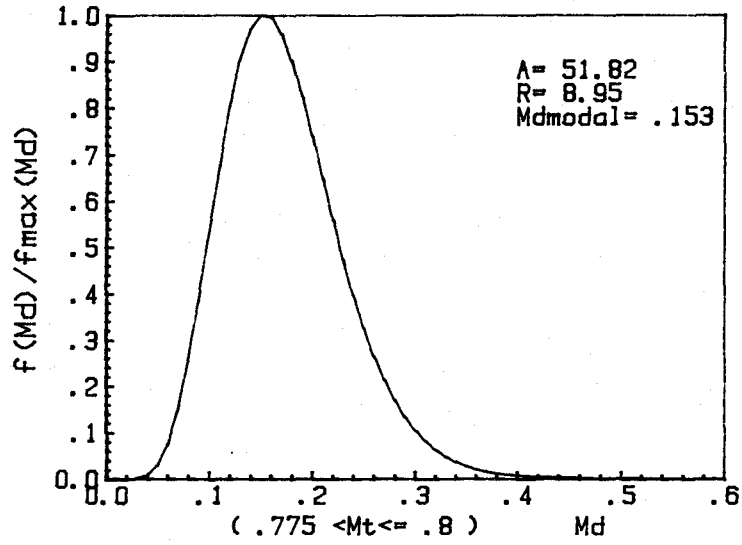


Fig. VI.40, altura del sol 70 grados. Intervalo Mt 0.75-0.80.

En definitiva, en este capítulo se han analizado las causas de las dispersiones de M_d para valores idénticos de M_t que aparecen en las distintas alturas del sol.

Se encuentra que la razón de esta dispersión es debida a la variación de los parámetros de turbidez β y α , a la masa de aire y al albedo de la superficie. Estos parámetros varían de un día a otro e incluso de una hora a otra. Los piranómetros que miden radiación global, no detectan estas variaciones debido a los efectos compensados en las componentes difusa y directa.

Los pirheliómetros que miden directa, sin embargo, si son sensibles a estos cambios.

Por todo ello, con medidas de radiación global y directa, sin tener en cuenta otros parámetros, es difícil obtener buenas correlaciones entre estas variables.

A consecuencia de lo anterior, se ha elaborado la metodología necesaria para modelizar las dispersiones.

Esta metodología consiste en separar las dos distribuciones de la nube de puntos M_t , M_d -que se muestran en las Figs. V.2 a V.8- utilizando la altura del sol como parámetro. La primera distribución se modeliza mediante una recta, y llega hasta un valor de M_t próximo a 0.35. La segunda, se divide en bandas de M_t de amplitud 0.025 ó 0.05 y se modeliza mediante funciones de densidad gamma. El punto de corte de ambas distribuciones se determina mediante criterios cuantitativos.

Para cada banda M_t estudiada, se aportan dos gráficas y los parámetros analíticos necesarios para reproducirlas. La primera representa la función densidad gamma de las dispersiones de M_d para

la banda M_t . En ella, la ordenada es el cociente entre la función densidad γ y el máximo valor de ésta. La abcisa es M_d . El área de esta curva entre dos valores de M_d , es la probabilidad de obtener un valor de M_d que caiga dentro del intervalo elegido, todo ello para una banda de M_t y una altura del sol.

La segunda curva que se aporta es la función de distribución en función de M_d y representa la integral de la función densidad. Se ha obtenido por dos motivos; el primero, ha sido necesario para comprobar la bondad de los ajustes realizados bajo el criterio de Kolmogorov-Smirnov. El segundo, porque facilita la lectura rápida del cálculo de probabilidad. Así, si se desea conocer la probabilidad de obtener un valor de M_d comprendido entre dos valores dados, sólo hay que hallar la diferencia de ordenadas.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- 1.- Se han modelizado mediante funciones densidad gamma de dos parámetros, las distribuciones de radiación difusa correspondientes a un valor dado de la radiación global y para una altura del sol determinada en condiciones de cielos claros.
- 2.- Se han obtenido las funciones de distribución de radiación difusa a partir de las funciones densidad gamma. Con ellas se puede hallar la probabilidad de tener un determinado valor de la radiación difusa si previamente se fija la radiación global y la altura del sol.
- 3.- Se han obtenido correlaciones entre la irradiancia difusa y la irradiancia global en función de la altura del sol para Sevilla, con valores instantáneos.

Estas se han modelizado analíticamente mediante dos tipos de distribuciones, una lineal y otra según una serie de Fourier con uno ó dos armónicos.

El punto de corte de ambas distribuciones se ha encontrado aplicando la condición de que el coeficiente de determinación de los ajustes realizados sea máximo.

- 4.- Se han obtenido correlaciones entre la irradiación difusa y la global horizontal horarias para Sevilla.

Se han modelizado con las mismas técnicas aplicadas para la irradiancia difusa y global.

- 5.- Las correlaciones de valores horarios de Iqbal, entre la radiación difusa y la global en función de la altura del sol han sido

expresadas satisfactoriamente en forma analítica. Se conocían soluciones gráficas.

- 6.- La comparación entre las correlaciones horarias de Sevilla y las de Iqbal en función de la altura del sol, muestra que, excepto para bajas elevaciones, no es importante tener en cuenta ésta. El resultado es significativo por cuanto la utilización de correlaciones con la altura del sol complica innecesariamente los cálculos.
- 7.- La altura del sol manifiesta su influencia en las correlaciones - para valores instantáneos entre la irradiancia difusa y la global horizontal. El máximo de irradiancia difusa para todas las alturas analizadas, excepto para 10° , se obtiene entre valores de irradiancia global comprendidos entre $0.4 H_{oh}$ y $0.5 H_{oh}$, siendo H_{oh} la irradiancia extraterrestre horizontal. El valor mínimo se da entre $0.7 H_{oh}$ y $0.78 H_{oh}$.
- 8.- Se aportan las correlaciones K_d , K_t siguientes:
 - Diarias y diarias promedio decenal de Madrid, Sevilla y Valencia.
 - Diarias promedio mensual de Madrid y Sevilla.
- 9.- Se deduce de la comparación entre las correlaciones aportadas y las obtenidas en otros países con parámetros idénticos a los nuestros, que no es conveniente aplicar las mismas correlaciones en todos los sitios. Ello puede ser una fuente importante de error de cálculos posteriores.

Incluso, correlaciones deducidas en diferentes zonas de un mismo país, pueden mostrar diferencias importantes. En nuestro caso, la estimación de radiación difusa para un valor fi-

jado de global es diferente según sea Madrid ó Sevilla y Valencia.

- 10.- A consecuencia de la heterocedasticidad decreciente con K_t observada en las correlaciones K_d , K_t diarias, se ha hecho un estudio de distribuciones de frecuencias relativas y acumuladas.
- 11.- Se ha diseñado y puesto a punto un sistema de medidas de radiación y parámetros meteorológicos relacionados con ellas que viene funcionando de forma automática desde el año 1983.

Las medidas están almacenadas en soporte magnético con frecuencia de 5 minutos y se dispone de listados diarios cada media hora.

- 12.- Una discusión acerca de los modelos de cálculos de radiación solar sobre superficies inclinadas, aconseja el modelo anisótropo de Hay como el más conveniente.

El modelo de R. Perez, más preciso que el anterior, necesita de ciertos parámetros basados en medidas locales de difusa y directa que normalmente no se poseen.

En cuanto a correlaciones K_d , K_t , dada la fuerte dispersión de valores de K_d para un valor fijo de K_t , se recomienda el uso de correlaciones diarias promedio mensual obtenidas con datos recogidos en localidades lo más semejantes a las que vayamos a aplicar.

BIBLIOGRAFIA

1. EQUIPO DE TRABAJO DE LA CATEDRA DE TERMODINAMICA Y FISICOQUIMICA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

Estudio de datos de radiación solar y temperatura ambiente de Andalucía. Elaboración de tablas y mapas.

Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Diciembre 1985.

2. KONDRATYEV, K. YA

Radiation in the Atmosphere, p. 538.

Academic Press, New York, 1969.

3. THRELKELD, J.L.

Solar irradiation of surfaces on clear days.

ASHRAE TRANSACTIONS, No. 1804, p. 24-36, 1963.

4. THRELKELD, J.L.

Thermal Environmental Engineering

Prentice-Hall, New York, p. 321-323, 1962.

5. TEMPS, R.C.

Solar radiation incident upon slopes of different orientations.

Master Thesis, 1977. University of California. Davis, California - 95616.

6. TEMPS, R.C. and COULSON K.L.

Solar radiation incident upon slopes of different orientations.

Solar Energy 19 (2), 179-184, 1977.

7. KLUCHER, T.M.

Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces.

Solar Energy, 23, 111-114, 1979.

8. HAY, J.E.
Study of Shortwave radiation on non-horizontal surfaces.
Canadian Climate Centre, Downsview, Ontario, 1979.
9. KONDRATYEV K. YA and MANILOVA M.P.
The radiation balance of slopes.
Solar Energy, 4, 14-19, 1960.
10. ROBINSON, N.
Solar radiation p.374.
Elsevier, New York, 1966.
11. REVFEIM, K.J.A.
A simple procedure for estimating global daily insolation on any -
surface.
J. Appl. Meteor. 17 (8), 1126-1131, 1978.
12. WILLMOTT, C.J.
On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate
solar collectors.
Solar Energy, Vol. 28 (3), p. 205-216, 1982.
13. PURI, V.M. and ALT.
Total and non-isotropic diffuse insolation on tilted surfaces.
Solar Energy, 25, p. 85-90, 1980.
14. LE QUERE, J.
Rapport sur la comparaison des méthodes de calcul des besoins de -
chauffage des logements.
Rapport CSTB TEA-587, 1980.

15. DOE 2-A-1979.
Lawrence Berkeley Laboratory, S. Francisco and L.A.S.L.
Los Alamos.

16. PEREZ, R.R., SCOTT S.T. and STEWART R.
An anisotropic model for diffuse radiation incident on slopes of -
different orientation and possible applications to CPPS.
Proc. of A.S.E.S., Minneapolis, Minn.

17. LEBRU, A.
Estimation des irradiations solaires horaires dans un plan quelcon-
que à partir de la donnée de l'irradiation horaire globale (et even-
tuellement) horizontale.
Rapport CSTB No. 289, Cahier 1847, Mai 1983 (France)

18. PEREZ, R. and STEWART, R.
Real time comparison of models estimating irradiation on sloping -
surfaces.
Progress in Solar Energy, Vol. (VII), ASES, 1984.

19. COULSON, K.L.
Solar and Terrestrial Radiation
Academic Press, New York, 1975.

20. ORGILL, J.F. and HOLLANDS, K.G.T.
Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal
surface.
Solar Energy, 19, 357-359, 1977.

21. ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A.
Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation.
Solar Energy, 28 (4), 293-302, 1982.
22. SPENCER, J.W.
A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation.
Solar Energy, 29 (1), 19-32, 1982.
23. BOES et AL.
Availability of direct, total and diffuse solar radiation to fixed and tracking collectors in the U.S.A.
Sandia Report. SAND77-0885, 1977
24. IQBAL, M.
Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface.
Solar Energy, 23 (5), 491-503, 1980.
25. BUGLER, J.W.
The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation.
Solar Energy, 19, 477-491, 1977.
26. PERRIN DE BRICHAMBAUT CHR
Estimation des ressource énergétiques solaires en France.
Supplément an Cahier AFEDE No. 1, 1975.
27. BRUNO, R.
A correction procedure for separating direct and diffuse insolation

on a horizontal surface.

Solar Energy, 20, 94-100, 1978.

28. LIU, B. and JORDAN, R.C.

The interrelationship and characteristic distribution of direct, -
diffuse and total solar radiation.

Solar Energy, 4, 1, 19 (1960).

29. COLLARES-PEREIRA, M. and RABL, A.

The average distribution of solar radiation correlations between -
diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation
values.

Solar Energy, 22 (2), 155-164, (1979).

30. RUTH, D.W. and CHANT, R.E.

The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada.

Solar Energy, 18, 153-154, (1976).

31. MUNEER, T. and HAWAS, M.M.

Correlation between daily diffuse and global radiation for India.

Energy Covers, Mgmt, 24 (2), 151-154, (1984).

32. PAGE, J.K.

The estimation of monthly mean values of daily total short-wave ra-
diation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for
latitudes 40N-40S.

Proc. U.N. Conf. New Sources Energy. Paper No. 598, 4 378-390, (1961)

33. WHILLIER, S.

The determination of hourly values of solar total radiation from -

- daily summation.
- Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser B7 (2), 197-204, (1956).
34. SMIETANA, P.J. and ALT.
- A new look at the correlation of Kd and Kt ratios and global solar radiation tilt models using one-minute measurements.
- Solar Energy, 32 (1), 99-107, (1984)
35. BARTOLI, B. and ALT.
- Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata.
- Solar Energy, 28 (24), 307-311, (1982).
36. G. WENDLER and F.D. EATON
- Quality Control for Solar Radiation Data.
- Solar Energy, 25, 131-138, 1980.
37. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY.
- An introduction to Meteorological Measurements and Data Handling - for Solar Energy Applications. October, 1980.
38. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY.
- Validation of the Guidelines for Portable Meteorological Instrument packages. October, 1980.
39. T.O. KVALSETH
- Cautionary note about R^2 .
- The American Statistician, November 1985, Vol. 39, No. 4 (Pt.1).

40. M. IQBAL.
An Introduction to Solar Radiation.
Academic Press, 1983.
41. J. MARCO
Estimación de la radiación difusa a partir de los registros de radiación solar global sobre un plano horizontal.
Tesis de Licenciatura, Universidad de Valencia, 1986.
42. J.D. GARRISON.
A study of the división of global irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty-three U.S. sites.
Solar Energy, 35, 4, 341-351, 1985.
43. J.E. SHERRY and C.G. JUSTUS
A simple hourly clean-sky solar radiation model based on meteorological parameters.
Solar Energy 30, 425-431, 1983.
44. G.L. POWELL
Comparative evaluation of SOLMET clear sky global solar radiation model.
Solar Energy, 32, 453-460, 1984.
45. P.W. Suckling and J. E. HAY
Modelling direct, diffuse and total solar radiation for cloudless days.
Atmosphere 14, 298-308, 1976.
46. D.H. HOYT
A model for the calculation of solar global insolation.

Solar Energy 21, 27-35, 1978.

47. T. SASAMORI, J. LONDON and D.V HOYT
Radiation budget of the Southern Hemisphere.
Aus. Meteorol. Soc. Mon. Boston 13, 9-23, 1972
48. SOLMET Vol. 2.
Hourly solar radiation-surface meteorological observation.
Final Report TD-9724.
National Climatic Center, Asheville, North Carolina, 1979.
49. R. BIRD and R.L. HULSTROM.
Direct insolation models.
Trans. ASME J.Sol. Energy. 103, 182-192, 1981.
See also SERI/TR-335-344 Solar Energy Research Institute, Golden,
Colorado, 1980.
50. R. BIRD and R.L. HULSTROM.
A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on
horizontal surface.
SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado
1981.
51. H. CRAMER
Metodos Matemáticos de Estadística.
Aguilar S.A. de Ediciones, 3ª Edición, 1963, Madrid.
52. J.Mª. CARIDAD Y OCERIN.
Cálculo de probabilidades y Análisis de datos.
Departamento de Estadística, Econometría e Investigación operativa



E.T.S.I.A., Universidad de Córdoba, 1983.

53. A. QUIJADA.

Construcción de un modelo matemático para la generación de series simuladas de factores climáticos primarios.

Tesis Doctoral. E.T.S.I. de Montes, Madrid, 1974.

54. WILK, M.B. y otros.

Estimation of parameters of the gamma distribution using order statistics.

Biometrika, 49, 3 and 4, p. 525, 1962.

55. A. LOUCHE, G. SIMONNOT and M. IQBAL.

Experimental verification of some clear sky insulations models.

Laboratoire d'Héliénergétique. Université de Corse|C.N.R.S.- UA877.
France. February 1986.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Reunido el Tribunal integrado por los abajo firmantes
en el día de la fecha, para juzgar la Tesis Doctoral de
D. Fabian Erueta Royego titulada "Distribuciones
de Irradiación Solar Difusa" acordó otorgarle la
calificación de APTO CUM LAUDE

Sevilla a 27 de Abril de 1987

Vocal



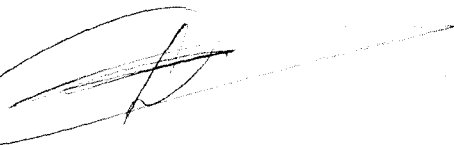
Vocal



Vocal



Presidente



secretario

