

**DEVIATIONS OF MODELED VALUES OF GLOBAL AND DIFFUSE  
IRRADIANCE ON VERTICAL SURFACES FROM EXPERIMENTAL DATA**

**DESVIACIONES ENTRE VALORES ESTIMADOS Y EXPERIMENTALES  
DE IRRADIANCIA GLOBAL Y DIFUSA SOBRE  
SUPERFICIES VERTICALES**

M.P. UTRILLAS, J.A. MARTINEZ-LOZANO y A.J. CASANOVAS

*Dpto. Termodinámica. Facultat de Física.*

*Univ. de Valencia. 46100 Burjassot, Valencia (España).*

**ABSTRACT**

A comparative analysis of the deviations from experimental data in the calculation of global and diffuse irradiance has been performed. Experimental comparative data are irradiance values on vertical surfaces at north, east, south and west orientations in Valencia (Spain), recorded hourly since January, 1 until June, 30, 1990. Evaluation has been performed using the isotropic-, Temps' and Coulson's, Klutcher's-, Hay's-, Skartveit's and Olseth's-, Gueymard's- and Perez' simplified tilted-surface models. Results of comparison show that for the south plane all models, except Gueymard's model, give acceptable results in the calculation of global irradiance. Calculated diffuse irradiance deviations from experimental are higher for all orientations. Perez's model is the only one giving relative deviations less than 20% for all orientations.

**RESUMEN**

A partir de registros experimentales de la irradiancia media horaria incidente sobre superficies verticales orientadas al Norte, Sur, Este y Oeste, durante el periodo comprendido entre el 1/01/90 y el 30/06/90 en Valencia (España), se realiza un análisis comparativo de las desviaciones respecto a los valores experimentales de los valores calculados de la irradiancia global y difusa por los siguientes ocho modelos de irradiancia solar difusa sobre superficies inclinadas: isotrópico, Temps y Coulson, Klutcher, Hay, Skartveit y Olseth, Gueymard y Perez (punto fuente  $0^{\circ}$  y circunsolar  $25^{\circ}$ ). Los modelos estudiados proporcionan, a excepción del de Gueymard, buenos resultados cuando se emplean para determinar la irradiancia solar global sobre superficies orientadas al Sur. Cuando se determinan valores de irradiancia difusa las desviaciones que presentan los modelos aumentan considerablemente, incluso para la orientación Sur, siendo el modelo de Pérez  $25^{\circ}$  el único que presenta errores inferiores al 20% en todos los planos.

**1. INTRODUCCION**

Para la mayoría de las aplicaciones prácticas de la energía solar son necesarios valores de irradiancia solar sobre superficies inclinadas. Ellos constituyen la base del cálculo de las ganancias energéticas que pueden

Una versión previa de este trabajo fue presentado en el V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables, celebrado en Madrid del 15-18 de Octubre de 1990.

conseguirse tanto mediante sistemas activos (térmicos, fotovoltaicos) como pasivos (edificios diseñados para un aprovechamiento racional de la energía). En los últimos años se han desarrollado diversos modelos para evaluar la irradiancia solar incidente sobre dichas superficies, con especial preferencia a la orientación Sur. Algunos de estos modelos han sido suficientemente contrastados por varios autores, mientras que otros han sido propuestos recientemente y su precisión está aún por evaluar.

Todos ellos parten de la hipótesis de que la irradiancia total sobre un plano de inclinación  $\beta$  y orientación  $A_p$  viene dada por:

$$I_{T\beta A_p} = I_{b\beta A_p} + I_{d\beta A_p} + I_{r\beta A_p} \quad [1]$$

donde  $I$  representa irradiancia (o irradiación en el caso de valores integrados temporalmente). El primer subíndice hace referencia al tipo de irradiancia (T total, b directa, n normal a los rayos solares, d difusa procedente del cielo, r difusa reflejada por el suelo), el segundo subíndice representa el ángulo de inclinación del plano  $\beta$ , y el tercero el acimut del plano  $A_p$ .

El primer término, correspondiente a la irradiancia directa, viene dado por la relación geométrica:

$$I_{b\beta A_p} = I_n \cos \theta \quad [2]$$

siendo  $\theta$  el ángulo que forman la dirección de los rayos solares y la normal a la superficie. Todos los modelos analizados utilizan la expresión [2] para calcular irradiancias directas sobre superficies inclinadas.

El término debido a la irradiancia reflejada por el suelo no se considera en este trabajo. Por consiguiente todas las medidas experimentales sobre superficies distintas a la horizontal se han realizado adaptando a los sensores horizontales artificiales.

La diferencia entre los distintos modelos considerados se limita por consiguiente a la aproximación empleada para determinar la irradiancia difusa ( $I_{d\beta A_p}$ ). No obstante, es habitual en la bibliografía comparar valores obtenidos mediante los modelos de irradiancia difusa con valores experimentales de irradiancia global, haciendo uso de la expresión [1]. El no comparar estrictamente los valores de irradiancia difusa experimentales y estimados puede originar un enmascaramiento de las desviaciones introducidas por dichos modelos, especialmente en condiciones de cielo claro (valores altos de irradiancia directa).

El objetivo de este trabajo es no sólo poner de manifiesto este hecho, sino realizar un análisis cuantitativo de los modelos para superficies verticales orientadas en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste que se extiende a ocho de los modelos más representativos de la bibliografía: isotrópico, Temps y Coulson, Klutcher, Hay, Skartveit y Olseth, Gueymard y Perez (punto fuente  $0^\circ$  y circunsolar  $25^\circ$ ). El análisis comparativo de las desviaciones, respecto a valores experimentales, se ha llevado a cabo tanto para valores de irradiancia global como para valores de irradiancia difusa incidentes sobre los cuatro planos indicados. En este análisis preliminar no se ha hecho distinción entre las distintas condiciones de cielo. Este hecho, que puede ir en perjuicio de la precisión de determinados modelos,

presenta la ventaja de ajustarse más a las condiciones reales de aplicación de los mismos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelos utilizados

Se relacionan a continuación los modelos empleados para el cálculo de la irradiancia difusa procedente del cielo. Únicamente indicaremos en cada caso la expresión final del modelo, dejando la descripción detallada de los mismos tanto a los trabajos originales de los autores, referenciados en cada caso, como a aquellos otros trabajos en los que se han comparado algunos de los modelos entre sí (1), (2), (3).

*Modelo isotrópico* (4), (5)

$$I_{d\beta A_p} = I_{d00} (1 + \cos \beta) / 2 \quad [3]$$

*Modelo de Temps y Coulson* (6)

$$I_{d\beta A_p} = I_{d00} [(1 + \cos \beta) / 2] [1 + \sin^3 (\beta / 2)] [1 + \cos^2 \theta \sin^3 (90 - \gamma)] \quad [4]$$

donde  $\gamma$  es la altura solar

*Modelo de Klutcher* (7)

$$I_{d\beta A_p} = I_{d00} [1 + \cos \beta] / 2 [1 + F \sin^3 (\beta / 2)] [1 + F \cos^2 \theta \sin^3 (90 - \gamma)] \quad [5]$$

donde  $F$  es un factor de modulación dado por  $F = 1 - (I_{d00} / I_{T00})^2$

*Modelo de Hay* (1), (8)

$$I_{d\beta A_p} = I_{d00} [k (\cos \theta / \sin \gamma) + (1 - k) (1 + \cos \beta) / 2] \quad [6]$$

siendo  $k$  el índice de anisotropía, dado por  $k = I_n / I_{sc}$ , y donde  $I_{sc}$  representa la constante solar

*Modelo de Skartveit y Olseth* (9)

$$I_{d\beta Ap} = I_{d00} [ k (\cos \theta / \sin \gamma) + Z \cos \beta + (1-k-Z) (1 + \cos \beta) / 2 - \sum (1-k-Z) \omega_i \cos \theta_i / \pi ] \quad [7]$$

siendo  $Z = 0.3-2k$  ( $Z = 0$  para  $k \geq 0.15$ )

El último término de [7] representa la irradiancia isotrópica apantallada por los obstáculos del horizonte real, siendo  $\omega_i$  y  $\theta_i$  el ángulo sólido y el ángulo de incidencia, respectivamente, bajo los cuales es visto, por el plano considerado, el sector  $i$  del horizonte real.

#### Modelo de Gueymard (10)

$$I_{d\beta Ap} = I_{d00} [ (1-N) R_{d0} + N R_{d1} ] \quad [8]$$

$N$  representa el índice de opacidad de las nubes,  $R_{d0}$  la irradiancia incidente en días claros y  $R_{d1}$  la irradiancia incidente en días totalmente cubiertos.

$$R_{d0} = \exp (a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos^2 \theta + a_3 \cos^3 \theta) + F(\beta) G(\gamma) \quad [9]$$

siendo  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  funciones de  $\gamma$ , con coeficientes de carácter local.

$$R_{d1} = (1 + \cos \beta) / 2 - [ \pi^{-1} (\beta \cos \beta - \sin \beta) + 1/2 (1 - \cos \beta) ] / [ 1 + 3 / (2b) ] \quad [10]$$

#### Modelo simplificado de Perez

La expresión original del modelo de Perez (11) es:

$$I_{d\beta Ap} = I_{d00} [ 0.5 (1 + \cos \beta) + a(\theta) (F_1 - 1) + b(\beta) (F_2 - 1) ] / [ 1 + c(\theta_2) (F_1 - 1) + d (F_2 - 1) ] \quad [11]$$

donde todas las magnitudes tienen carácter geométrico excepto  $F_1$  y  $F_2$ , que son los coeficientes que proporcionan el grado de anisotropía del modelo.

El modelo utilizado en este trabajo es una versión simplificada del anterior, propuesta por los mismos autores (12), en la forma:

$$I_{d\beta Ap} = I_{d00} [ 0.5 (1 + \cos \beta) (1 - F'_1 - F'_2) + F'_1 (a/c) + F'_2 (b/d) ] \quad [12]$$

ecuación lineal en  $F'_1$  y  $F'_2$ , que son los coeficientes reducidos del modelo, y que se conoce como modelo simplificado de Perez.

En esta versión del modelo, la zona de horizonte se considera de altura cero, y la zona circunsolar con un ángulo sólido cuyo semiángulo  $\alpha$  puede tomar los valores  $\alpha = 0^\circ$  (punto fuente) y  $\alpha = 25^\circ$  ( $25^\circ$  circunsolar). El modelo  $25^\circ$  circunsolar es más complejo pero más preciso. En el presente trabajo se ha aplicado el modelo utilizando alternativamente ambos valores de  $\alpha$ .

No se han tenido en cuenta modificaciones de carácter menor utilizadas en trabajos posteriores por los mismos autores y recopiladas recientemente en (13).

### 3. DATOS EXPERIMENTALES

Para comparar los distintos modelos se han empleado medidas experimentales correspondientes al período comprendido entre el 1 de Enero y el 30 de Junio de 1990. Las medidas se han llevado a cabo en el Campus de Burjassot (Valencia), que se encuentra a  $39,5^\circ N$  de latitud y a 40 m. de altura sobre el nivel del mar. Los obstáculos del horizonte no superan la altura de  $4^\circ$ , con excepción de una pequeña banda en el Noroeste.

La estación de medida consta de un pirheliómetro Eppley NIP para medida de la irradiancia directa, un piranómetro Kipp-Zonen CM-6 para medida de la irradiancia global sobre un plano horizontal y cuatro piranómetros Kipp-Zonen CM-11 para medida de irradiancia global sobre superficies verticales orientadas al Norte, Sur, Este y Oeste. La irradiancia difusa se calcula en todos los planos mediante el método sustractivo. Los piranómetros utilizados para el registro de la irradiancia sobre planos verticales están provistos de horizonte artificial que impide que les llegue la irradiancia reflejada por el suelo. Todos los piranómetros utilizados han sido comparados previamente en una superficie horizontal con un Eppley PSP.

El instrumento de registro y almacenamiento temporal de los datos es un datalogger LI-1000 de la casa LI-COR. Los registros obtenidos se acumulan y, una vez promediados, se almacenan cada diez minutos.

### 4. DETERMINACION DE DESVIACIONES

Para determinar la precisión de los modelos se han utilizado la desviación media del sesgo (mean bias deviation, MBD), desviación absoluta media (mean absolute deviation, MAD) y desviación cuadrática media

(root mean square deviation, RMSD). El RMSD confiere mayor peso que el MAD a los puntos que están más alejados del valor medio, por lo que, en nuestra opinión, este último proporciona resultados más realistas. Ambos adquieren siempre valores positivos. Por el contrario el MBD puede tomar valores positivos y negativos, correspondiendo respectivamente a una sobreestimación o una subestimación por parte del modelo.

Se ha mantenido el término desviación respecto a valores experimentales, aunque sería más preciso hablar de *error* por coherencia con la bibliografía precedente, ya que evidentemente los valores experimentales no están exentos de error. Por otra parte hay que indicar que aunque en la bibliografía es habitual trabajar con valores absolutos de estos parámetros, en este trabajo se ha optado por indicar los valores relativos de los mismos con el fin de disponer de resultados comparables al normalizar los valores de los niveles de irradiancia incidente sobre los diferentes planos.

## 5. RESULTADOS

Todos los modelos se han comparado utilizando los coeficientes propuestos por sus autores, lo que permite poner de manifiesto el posible carácter local de los mismos. Se han aplicado a valores de irradiancia medios de 10 minutos y horarios. Los resultados obtenidos en ambos casos son similares, por lo que se presentan aquí únicamente los correspondientes a valores medios horarios, que son los utilizados habitualmente en la bibliografía.

En las Tablas I–IV se presentan los valores relativos de MBD, MAD y RMSD obtenidos al comparar los valores proporcionados por los distintos modelos con los valores experimentales de irradiancia global y de irradiancia difusa.

Para el plano Norte (Tabla I) se observa que cuando se aplican los modelos al cálculo de la contribución difusa, los errores que se obtienen son sólo ligeramente superiores a los que se tienen cuando se aplican al cálculo de la irradiancia global. Este hecho se repite en todos los modelos considerados. En este plano la contribución de la irradiancia directa es prácticamente nula a lo largo del año. En el período considerado (Enero-Junio) sólo alcanza valores apreciables durante Mayo y Junio, como se muestra en la Fig. 1. La irradiancia difusa es por tanto la única contribución significativa en el cálculo de la irradiancia global, lo que explica la similitud de valores en todos los estimadores de error. En cualquier caso es de resaltar que éstos son muy altos para todos los modelos.

Para el plano Sur (Tabla II) se observa que los errores asociados al cálculo de difusa son entre dos y tres veces superiores (según los modelos) a los asociados al cálculo de global. Un estudio más detallado de los mismos, es posible que muestre que los valores de los errores que se obtienen cuando aplicamos los modelos estrictamente al cálculo de irradiancia difusa aumentan durante los meses de invierno, cuando la contribución relativa de la irradiancia directa es mayor en este plano (Fig. 2). La Tabla II pone de manifiesto que modelos que pueden considerarse válidos para la determinación de la irradiancia global sobre el plano Sur (todos excepto

TABLA I

*Errores relativos correspondientes a las irradiancias global y difusa (medias horarias) incidentes sobre un plano vertical de orientación Norte en Valencia.*

MODELOS	GLOBAL			DIFUSA		
	MBD	MAD	RMSD	MBD	MAD	RMSD
ISOTROPO	7.5	26.9	37.4	8.1	29.2	40.5
TEMPS Y COULSON	43.2	51.2	71.9	46.8	55.3	77.8
KLUTCHER	28.6	38.0	55.1	31.0	41.4	59.6
HAY	-17.8	33.5	41.8	-19.3	36.3	45.2
SKARTVEIT Y OLSETH	-25.3	31.5	39.7	-27.3	34.1	42.9
GUEYMARD	24.2	41.0	98.9	28.4	45.1	107.3
PEREZ (0°)	-14.8	20.4	27.6	-16.0	22.1	30.0
PEREZ (25°)	-1.1	14.0	19.4	1.2	15.1	21.0

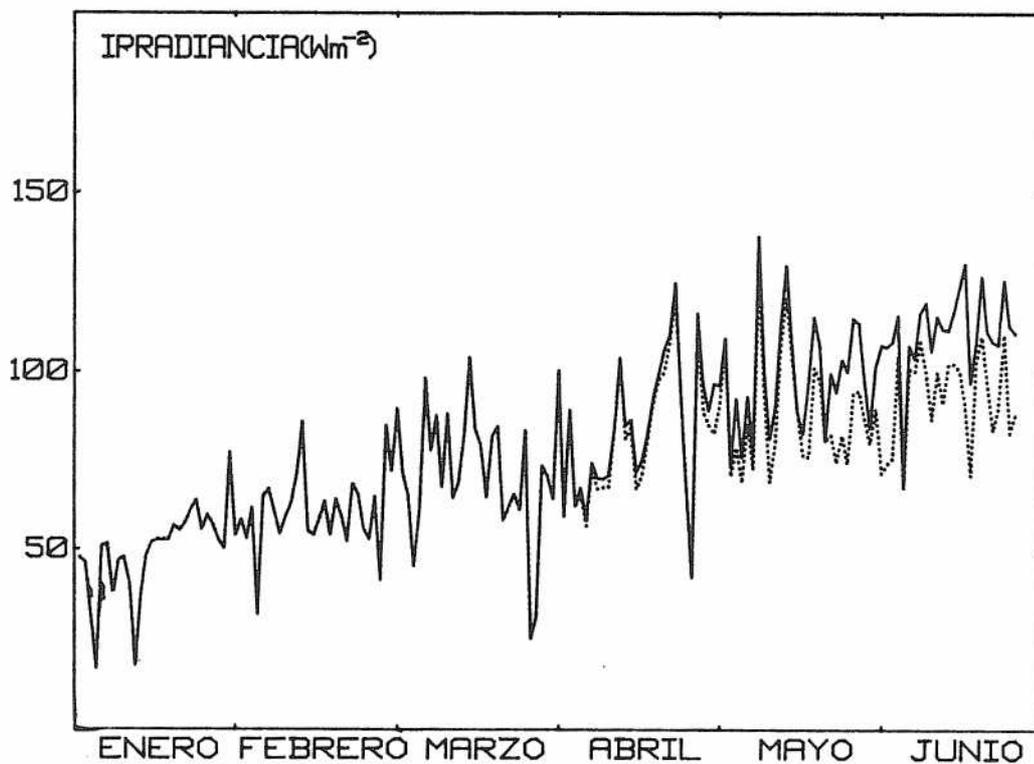


Fig. 1.— Evolución temporal de los valores medios diarios de la irradiancia global (línea continua) y de la irradiancia difusa (línea de puntos) incidentes sobre un plano vertical de orientación Norte.

TABLA II

*Errores relativos correspondientes a las irradiancias global y difusa (medias horarias) incidentes sobre un plano vertical de orientación Sur en Valencia.*

MODELOS	GLOBAL			DIFUSA		
	MBD	MAD	RMSD	MBD	MAD	RMSD
ISOTROPO	-11.6	13.1	18.6	-27.4	31.1	44.1
TEMPS Y COULSON	2.7	12.1	15.2	6.5	28.6	36.0
KLUTCHER	-3.2	8.8	12.2	-7.8	20.9	28.8
HAY	-10.0	12.1	15.9	-23.6	28.6	37.6
SKARTVEIT Y OLSETH	-12.2	13.2	16.7	-28.9	31.3	39.5
GUEYMARD	29.7	49.3	84.2	70.5	115.9	198.9
PEREZ (0°)	-4.1	8.4	12.5	-8.9	19.2	27.3
PEREZ (25°)	-4.8	7.5	10.8	-10.6	16.9	22.9

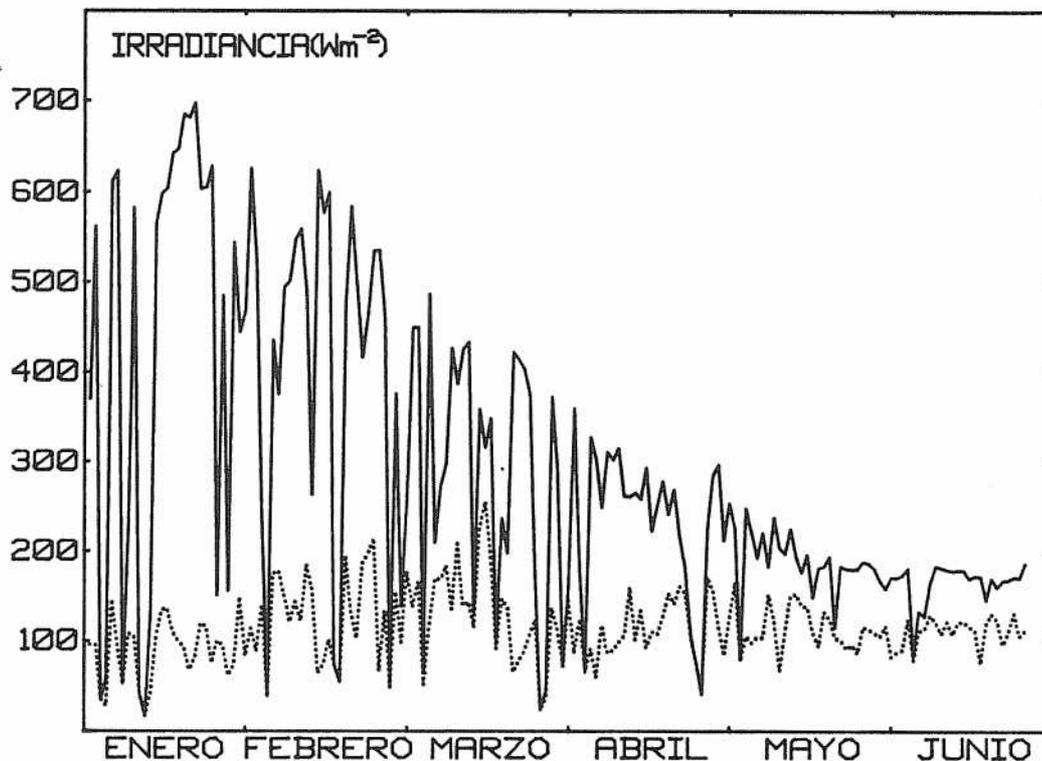


Fig. 2.— Evolución temporal de los valores medios diarios de la irradiancia global (línea continua) y de la irradiancia difusa (línea de puntos) incidentes sobre un plano vertical de orientación Sur.

el de Gueymard) deben utilizarse con reservas cuando se aplican a la determinación de la componente difusa de dicha irradiancia.

Los resultados que se obtienen para los planos Este

(Tabla III) y Oeste (Tabla IV) son comparables. En ambos planos se obtienen valores similares de MAD y RMSD para cada uno de los modelos considerados y, en general, estos valores se duplican cuando el modelo en

TABLA III

*Errores relativos correspondientes a las irradiancias global y difusa (medias horarias) incidentes sobre un plano vertical de orientación Este en Valencia.*

MODELOS	GLOBAL			DIFUSA		
	MBD	MAD	RMSD	MBD	MAD	RMSD
ISOTROPO	-9.4	18.7	22.6	-18.6	36.7	55.0
TEMPS Y COULSON	9.7	21.3	28.1	19.2	42.0	55.3
KLUTCHER	1.5	17.3	23.8	3.0	33.9	46.9
HAY	-12.7	17.1	22.6	-25.1	33.8	44.5
SKARTVEIT Y OLSETH	-15.8	17.4	22.9	-31.1	34.2	45.2
GUEYMARD	14.3	41.4	99.2	28.5	80.8	195.1
PEREZ (0°)	-6.0	10.1	15.6	-11.9	19.8	30.7
PEREZ (25°)	-4.0	8.2	12.2	-7.8	16.1	24.0

TABLA IV

Errores relativos correspondientes a las irradiancias global y difusa (medias horarias) incidentes sobre un plano vertical de orientación Oeste en Valencia.

MODELOS	GLOBAL			DIFUSA		
	MBD	MAD	RMSD	MBD	MAD	RMSD
ISOTROPO	-7.1	16.3	24.4	-14.6	33.8	50.5
TEMPS Y COULSON	14.2	20.2	26.8	29.5	41.8	55.7
KLUTCHER	4.6	15.6	22.5	9.6	32.4	46.6
HAY	-6.4	14.4	19.8	-13.1	29.7	41.0
SKARTVEIT Y OLSETH	-9.4	14.1	20.2	-19.6	29.3	41.8
GUEYMARD	19.1	44.6	105.7	39.6	91.9	218.9
PEREZ (0°)	-0.8	11.8	21.5	0.1	22.7	37.9
PEREZ (25°)	1.5	9.9	17.9	4.8	18.9	28.9

lugar de estimar valores de irradiancia global se aplica para la estimación de valores de irradiancia difusa. La evolución de los valores diarios de irradiancia global y

difusa, obtenidos a partir de las medidas experimentales, es análoga para ambos planos, como muestran la Fig. 3 (plano Este) y la Fig. 4 (plano Oeste).

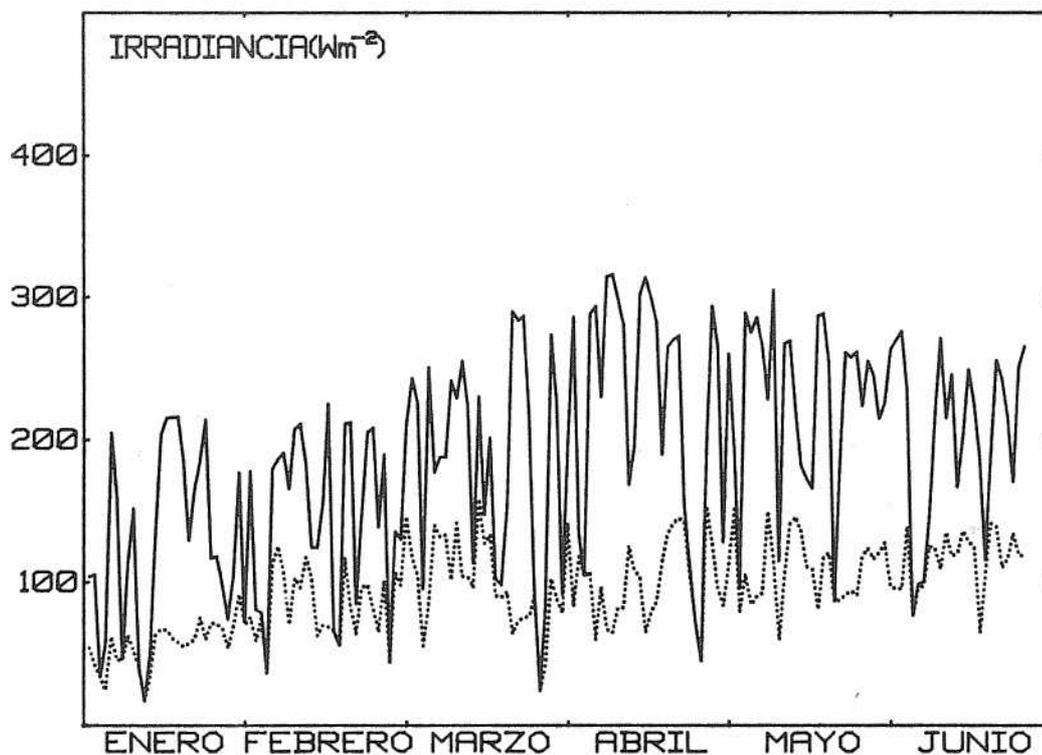


Fig. 3.— Evolución temporal de los valores medios diarios de la irradiancia global (línea continua) y de la irradiancia difusa (línea de puntos) incidentes sobre un plano vertical de orientación Este.

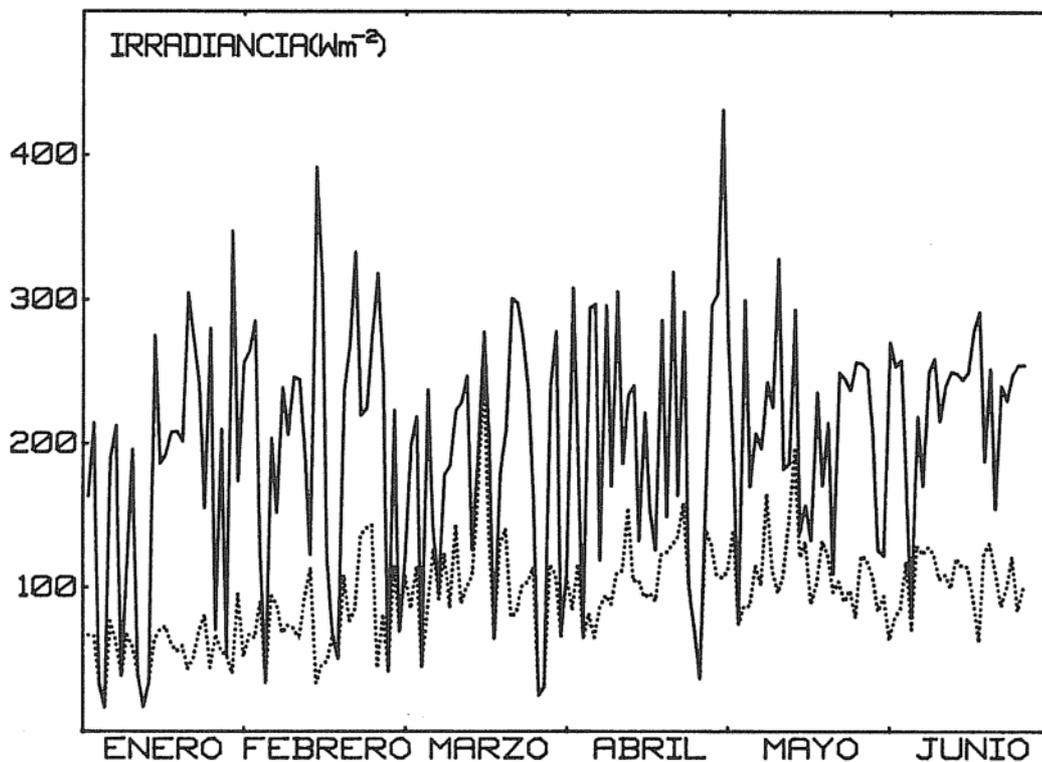


Fig. 4.— Evolución temporal de los valores medios diarios de la irradiancia global (línea continua) y de la irradiancia difusa (línea de puntos) incidentes sobre un plano vertical de orientación Oeste.

## 6. CONCLUSIONES

Los modelos estudiados (a excepción del de Gueymard) proporcionan buenos resultados cuando se emplean para determinar irradiancia solar global sobre superficies verticales orientadas al Sur. En otras orientaciones, únicamente el modelo de Pérez proporciona resultados aceptables. Cuando se determinan valores de irradiancia difusa las desviaciones introducidas por los modelos aumentan considerablemente, incluso para la orientación Sur, siendo el modelo de Pérez 25° el único que presenta desviaciones inferiores al 20% con respecto a los valores experimentales en todos los planos.

En cualquier caso, hay que señalar que los modelos emplean como valor de entrada la irradiancia difusa horizontal y que los errores originados por los aparatos de medida (que en valor medio, son de un 3% para el pirheliómetro NIP de Eppley y de un 5% para los piranómetros Kipp-Zonen) pueden producir grandes errores en los valores de irradiancia difusa (calculados

por el método sustractivo) en condiciones de cielo muy claro. No se ha profundizado más en esta incidencia ni tampoco se ha tenido en consideración el factor de corrección pirheliométrico propuesto por algunos autores (14) para eliminar la contribución circunsolar en las medidas de irradiancia directa. El Eppley NIP utilizado en este trabajo presenta un ángulo de apertura de 5°43', por lo que la contribución circunsolar a las medidas de irradiancia directa puede tener una incidencia apreciable sobre los valores de irradiancia difusa en condiciones de cielo claro. En cualquier caso, la comparación de unos modelos con otros se ve mínimamente afectada por estas consideraciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por la Institució Valenciana d'Estudis i Investigació (IVEI).

## BIBLIOGRAFIA

1. J.E. HAY y D.C. MCKAY: *Int. J. Solar Energy*, **3**, 203 (1985).
2. J.E. HAY, R. PEREZ y D.C. MCKAY: *Int. J. Solar Energy*, **4**, 321 (1986).
3. M. P. UTRILLAS, J.A. MARTINEZ-LOZANO y A.J. CASANOVAS: *Solar Energy*, **47**, 223 (1991).
4. K.Y. KONDRATYEV y M.P. MANOLOVA: *Solar Energy*, **4**, 14 (1960).
5. B.Y.H. LIU y R.C. JORDAN: *ASRHAET J.*, **3**, 53 (1961).
6. R.C. TEMPS y K.L. COULSON: *Solar Energy*, **19**, 179 (1977).
7. T.M. KLUCHER: *Solar Energy*, **23**, 111 (1979).
8. J.E. HAY: *Solar Energy*, **23**, 301 (1979).
9. A. SKARTVEIT y J.A. OLSETH: *Solar Energy*, **36**, 333 (1986).
10. C. GUEYMARD: *Solar Energy*, **38**, 367 (1987).
11. R. PEREZ, R. STEWART, C. ARBOGAST, R. SEALS y J. SCOTT: *Solar Energy*, **36**, 487 (1986).
12. R. PEREZ, R. SEALS, P. INEICHEN, R. STEWART y D. MENICUCCI: *Solar Energy*, **39**, 221 (1987).
13. R. PEREZ, P. INEICHEN, R. SEALS, J. MICHALSKY y R. STEWART: *Solar Energy*, **44**, 271 (1990).
14. C. GUEYMARD: *Atmosphere-Ocean*, **24**, 1 (1986).

★ ★ ★ ★ ★

