

RADIACIÓN SOLAR GLOBAL Y DIFUSA PARA DISTINTOS INDICES DE CLARIDAD ATMOSFÉRICA Área Metropolitana de San Juan

Mario Cúnsulo¹

Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental “Arq. Alberto Papparelli” (INEAA) –Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño Universidad Nacional de San Juan (FAUD – UNSJ)
Teléfono: 0264-202664; E- mail Institucional: inea@unsj.edu.ar

RESUMEN: Se presenta un estudio cuyo objetivo es la determinación de la correlación entre la radiación difusa y la radiación global (R_{DIF}/R_G) y el Índice de claridad (K_T) en una zona urbana árida. Se utilizan registros de radiación difusa (R_{DIF}) y radiación global (R_G) obtenidos desde el año 1995 al año 2011. Se estudian las correlaciones descartando los valores de salida y puesta del sol. Los resultados obtenidos son concordantes con la bibliografía consultada. Se verifica la notable cantidad de días despejados para el área de estudio, particularmente en la estación cálida. El análisis de valores horarios reflejan con mayor fidelidad las situaciones puntuales de nubosidad.

Palabras clave: radiación solar difusa, radiación solar global, índice de claridad, zonas áridas

INTRODUCCION

Para diseñar y ejecutar sistemas de aprovechamiento de energía solar es muy importante conocer la cantidad de la radiación global (R_G) y sus componentes, la radiación difusa (R_{DIF}) y la directa (R_{DIR}) (El-Sebaï *et al.*, 2010), entre otras variables climáticas fundamentales.

En ciudades localizadas en zonas áridas como es el caso de San Juan por los bajos niveles de nubosidad y por tanto altos porcentajes de heliofanía relativa, la radiación solar en los meses cálidos y en los fríos, constituye un parámetro sustancial en el balance energético para el cálculo de la carga térmica, requerida para obtener las estrategias de diseño bioclimático destinadas al confort higrotérmico de la población.

En muchas localidades, las mediciones de radiación solar global y particularmente sus componentes directa y difusa, no se encuentran fácilmente disponibles, a lo que se suman las limitaciones financieras, técnicas e institucionales (Wu *et al.*, 2007), (Ulgen *et al.*, 2009).

Desde la fecha de instalación del bloqueador solar (Papparelli y Cúnsulo, 2005) la Unidad Ejecutora, cuenta con registros simultáneos de R_G y R_{DIF} con una estadística confiable (Ortega *et al.*, 2013) para realizar el estudio que aquí se propone.

Liu y Jordan (1960), Duffie y Beckman (1974), Collares-Pereira y Rabl (1979) y Erbs *et al.* (1982) entre otros autores, realizaron estudios similares para diversas localizaciones. En el trabajo que se presenta, se comprobarán los resultados en forma comparativa.

Los resultados del presente proyecto permitirán inferir los valores de R_{DIF} a partir de la correlación entre el cociente R_{DIF}/R_G y los valores de claridad de cielo K_T , variable que se puede calcular en forma sencilla a partir de los datos de radiación solar en el borde de la atmósfera para la localidad en estudio y de los valores de R_G , variable que se puede disponer entre los datos climáticos de la misma localidad.

¹ Profesor Adjunto FAUD-UNSJ, Profesional Principal CONICET

BASE DE DATOS METEOROLÓGICOS

En un proyecto de investigación en el marco de la convocatoria 2014-2015 de la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan, denominado: “Correlación entre radiación solar difusa y radiación solar global en zona urbana árida”, se procesó una base de datos climáticos 2005-2011, provenientes de dos estaciones meteorológicas digitales ubicadas en el centro del Área Metropolitana de San Juan, en la terraza del edificio sede del INEAA (Santa Fe esq. Sarmiento). En el periodo citado se dispone de valores de radiación global y radiación difusa sobre plano horizontal.

Ambas radiaciones se registran con piranómetros marca LI-COR PY36474. Uno de ellos conectado a una de las estaciones meteorológicas, está expuesto a las condiciones ambientales libre de obstrucciones y perfectamente nivelado; con él se registra la radiación solar global (R_G) sobre plano horizontal. El segundo, conectado a la segunda estación meteorológica, se encuentra instalado en conjunto con el bloqueador de Radiación Directa (Papparelli y Cúnsulo, 2005), también libre de otras obstrucciones y perfectamente nivelado, el que registra valores de R_{DIF} .

La base de datos analizada contiene registros hora a hora de valores de radiación solar global y radiación solar difusa para todos los días de todos los meses de los años 2005 a 2011. Para facilitar el procesamiento de la información se elaboraron planillas de cálculo, las que pueden ser consultadas en el INEAA. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones de Raichijk (2012) y Younes, *et al.* (2005) para la depuración de valores inconsistentes en la base de datos. Se eliminaron además los registros cercanos a la salida y puesta del sol que presentan valores distorsivos.

CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL BORDE DE LA ATMÓSFERA Y CÁLCULO DE ÍNDICE DE CLARIDAD.

La radiación solar extraterrestre es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera de la Tierra. El valor se define a partir del valor de la constante solar

Para la conformación de la base de datos a utilizar para el presente trabajo, además de su ordenación cronológica fue necesario el cálculo de los índices K_T mediante la división de los valores horarios de la radiación extraterrestre (R_{ext}), calculada mediante la ecuación (1) (Plasencia, *et al.*):

$$R_{ext} = I_0 * [1 + 0.033 * \cos(0.984 * Dj)] * (\sin(Dsol) + \cos(L) * \cos(Dsol) * \cos(Whr)) \quad (1)$$

Donde: I_0 = constante solar (1367 W/m^2 , según el World Radiation Center); Dj = día juliano; L = latitud°; para San Juan $L= 31^\circ 30'$; $Dsol$ = declinación solar (°); Whr = ángulo horario (°): 0 para el mediodía solar, aumentando 15° por hora, hacia el amanecer y disminuyendo 15° por hora, hacia el atardecer.

En la Tabla 1 se presentan los valores de Dj y $Dsol$ para cada mes.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Día	15	16	16	15	15	15	16	16	15	15	15	15
Dj	15	47	75	105	135	166	197	228	258	288	319	349
Dsol °	-20.9	-13	-2.4	9.4	18.8	23.1	21.2	13.5	2.2	-9.6	-18.9	-23.0

Tabla 1: Valores mensuales de Dj y $Dsol$.

PROCESAMIENTO DE VALORES HORARIOS Y DIARIOS DE R_G , R_{DIF} Y K_T

Se realizan dos análisis pormenorizados de las relaciones entre R_G , R_{DIF} y K_T : en primer lugar se estudian las relaciones horarias de la relación R_{DIF}/R_G y K_T . En segundo lugar se calculan las mismas correlaciones pero considerando valores totales diarios. Para ello se utiliza la base inicial de datos

procesados y depurados que se obtuvo en el proyecto interno de investigación 2014-2015 (Cúnsulo 2015). Se adopta la recomendación derivada del proyecto antes mencionado y se descartan los valores cercanos a los horarios de salida y puesta del sol por presentar anomalías debidas a error instrumental del solarímetro. En este estudio se tienen en cuenta todos los registros, sin eliminar los registros de cielo nublado.

Esta base de datos se complementa con valores calculados de R_{ext} para cada hora. Para ello se utiliza la fórmula del párrafo anterior, aplicando los valores de la Tabla 1. Este valor se considera independiente del año considerado. La planilla de cálculos se preparó de forma que en la columna de R_{ext} se colocaron los valores horarios para determinar esta correlación o el valor total diario para la correlación diaria. En la Figura 1 se presenta la planilla correspondiente a esta última situación, es decir, para el cálculo diario de un día del mes de diciembre solo de los años 2005, 2006 y 2007. La planilla oculta en este caso los valores horarios. En la última fila de cada día se calculó el total diario y en la columna R_{ext} se consigna el valor diario. Posteriormente filtrando los valores de la columna “hora” para que muestre solo los valores 23:00 se extrajeron en planillas auxiliares los valores de R_{DIF}/R_G y K_T calculados. En la Tabla 2 se muestra el cálculo de la R_{ext} para el cálculo diario correspondiente a cada mes.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$R_{ext} (Wh/m^2)$	9250	8429	7132	5835	4539	3998	4214	5187	6808	8105	8969	9488

Tabla 2: Valores mensuales de $R_{ext} (Wh/m^2)$ para cálculo diario

DIA	HORA	HSV	Rext	2005				2006				2007												
				GLOBAL	DIFUSA	R_{DIF}/R_{GB}	K_T	GLOBAL	DIFUSA	R_{DIF}/R_{GB}	K_T	GLOBAL	DIFUSA	R_{DIF}/R_{GB}	K_T									
1	0:00	22:30	9488.0																					
	1:00	23:30																						
	2:00	00:30																						
	3:00	01:30																						
	4:00	02:30																						
	5:00	03:30																						
	6:00	04:30																						
	7:00	05:30																						
	8:00	06:30																						
	9:00	07:30				436.5	35.6			254.1	168.9			443.1	51.3									
	10:00	08:30				654.8	37.3			628.8	136.9			659.4	50.8									
	11:00	09:30				857.9	39.5			927.4	70.3			865.7	57.4									
	12:00	10:30				1013.6	40.7			1057.6	38.1			1034.8	66.8									
	13:00	11:30				1100.6	43.3			1134.6	41.0			999.9	69.6									
	14:00	12:30				1118.4	43.1			1135.9	41.1			1153.4	104.0									
	15:00	13:30				1065.9	44.8			1091.2	40.3			1114.3	76.9									
	16:00	14:30				976.5	58.6			964.5	39.5			991.0	86.6									
	17:00	15:30				800.1	66.1			777.3	41.5			566.6	241.5									
	18:00	16:30				570.2	43.4			555.9	43.3			315.4	259.2									
	19:00	17:30																						
	20:00	18:30																						
	21:00	19:30																						
	22:00	20:30																						
	23:00	21:30				8594.3	452.3	0.053	0.906	8527.1	660.9	0.078	0.899	8143.6	1064.0	0.131	0.858							

Figura 1: Ejemplo de Base de datos procesada.

En el caso de realizar el análisis horario, esta columna R_{ext} contiene el valor correspondiente a cada hora. En las columnas respectivas se muestran los cálculos de R_{DIF}/R_G y K_T y se ocultan los valores de la última fila.

RESULTADOS:

Determinación de la correlación entre R_G y R_{DIF} para diversos índices de claridad

Se realizan dos análisis pormenorizados de las relaciones entre R_G , R_{DIF} y K_T : en primer lugar se estudian las correlaciones horarias de la relación R_{DIF}/R_G y K_T . En segundo lugar se calculan las mismas correlaciones pero considerando valores totales diarios.

En la Figura 2 se presentan las gráficas de correlación para valores **horarios** correspondientes a todos los meses, las cuales muestran un patrón de comportamiento similar, si bien en los meses de verano o cálidos se detecta mayor concentración de valores con bajo índice K_T y elevada relación R_{DIF}/R_G .

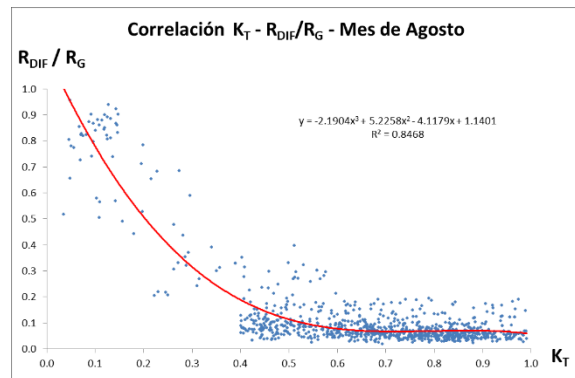
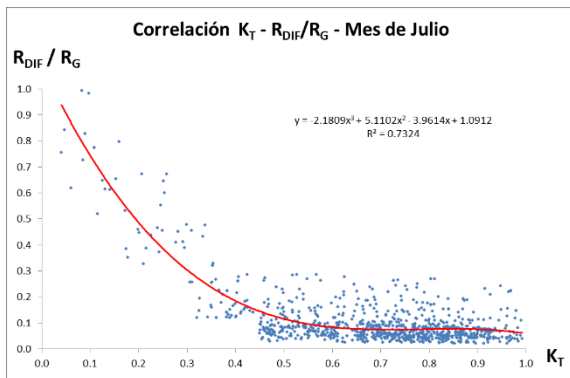
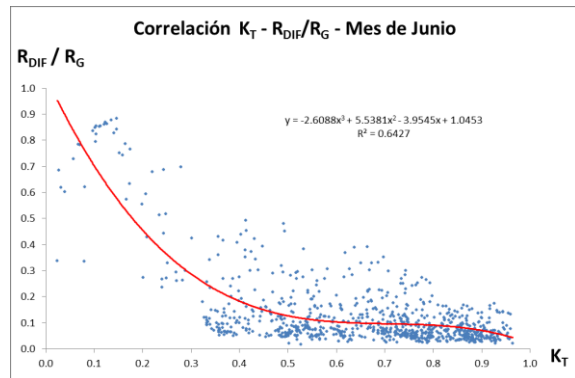
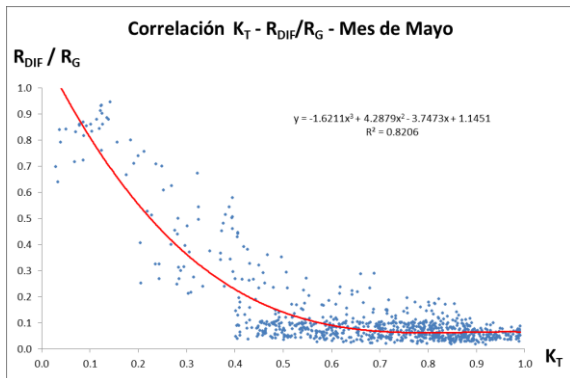
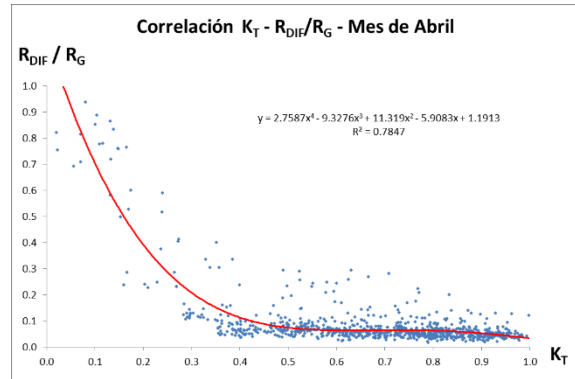
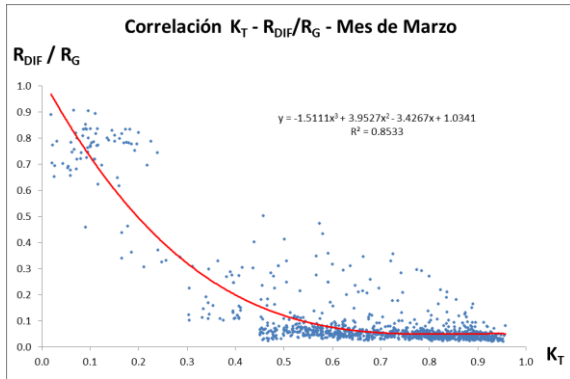
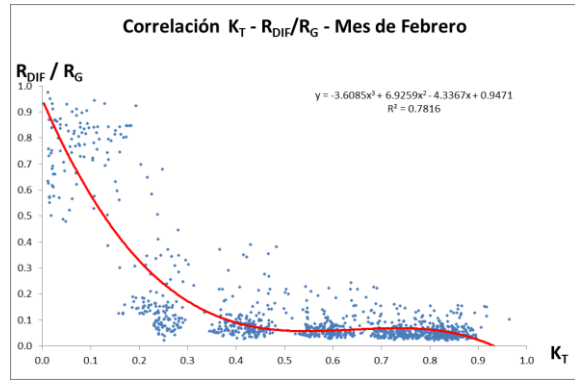
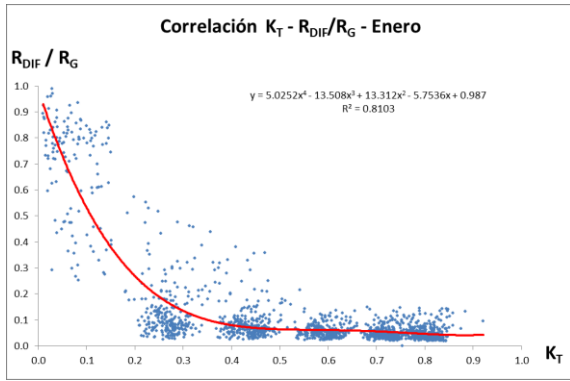


Figura 2: Ejemplo de grafica de correlación para valores horarios

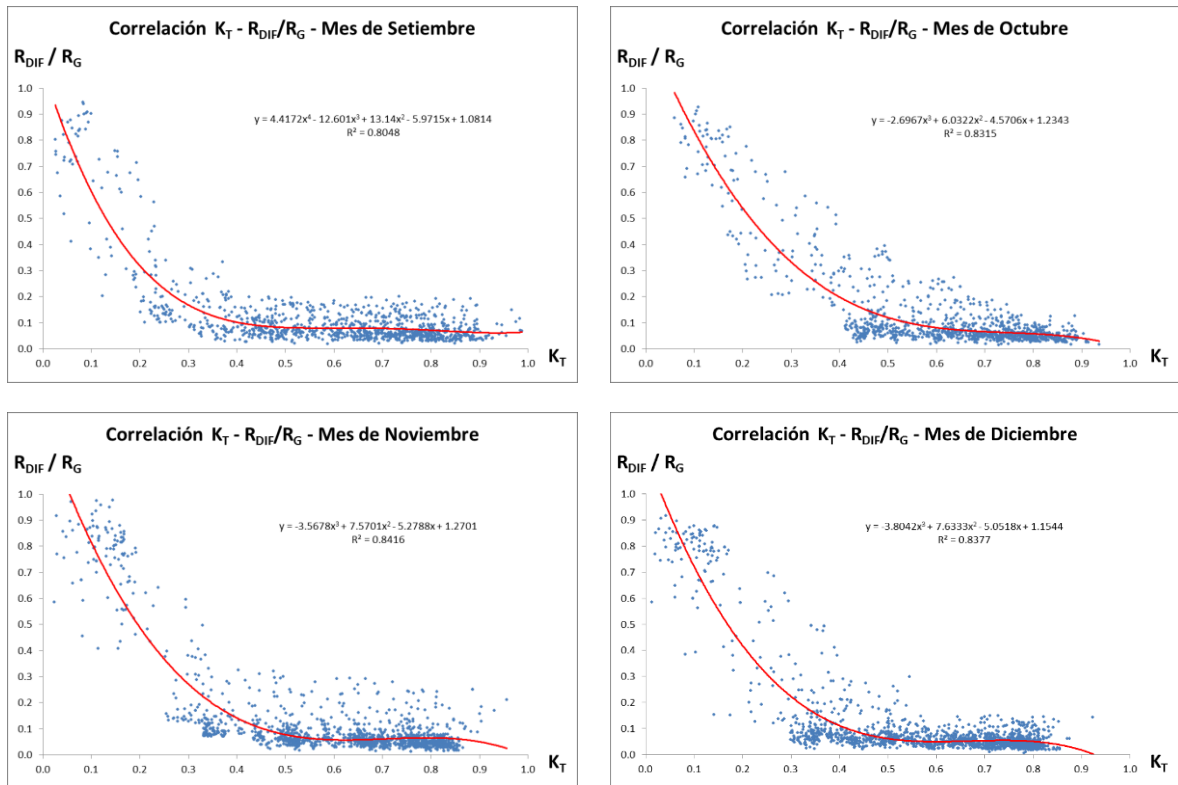


Figura 2(continuación): Ejemplo de grafica de correlación para valores horarios.

En la Figura 3 se presentan las gráficas de correlación para valores **diarios** correspondientes a todos los meses, las cuales muestran un patrón de comportamiento similar. Contrariamente a lo que pasa en el caso de considerar valores horarios, en los meses de verano o cálidos se detecta menor concentración de valores con bajo índice K_T y elevada relación R_{DIF}/R_G respecto de los meses fríos.

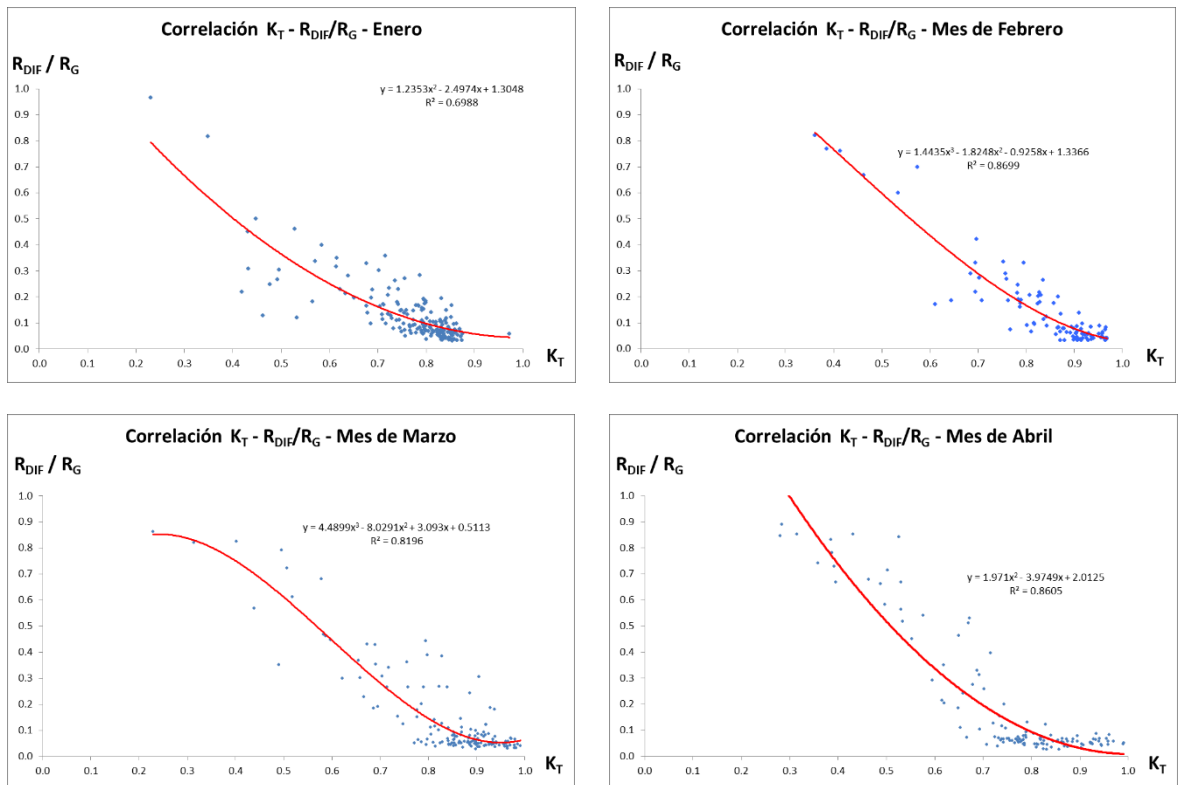


Figura 3: Ejemplo de grafica de correlación para valores diarios.

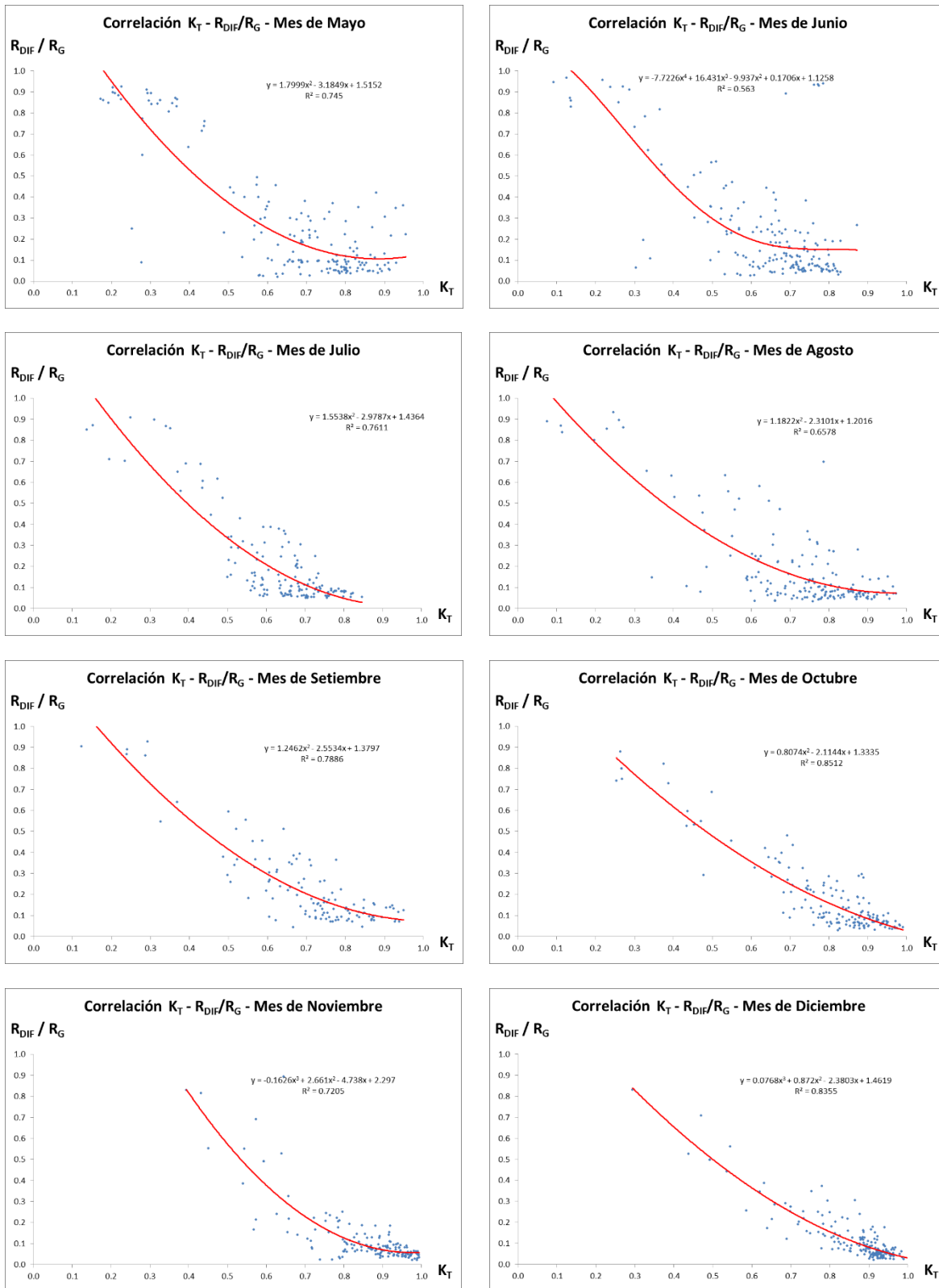


Figura 3(Continuación): Ejemplo de grafica de correlación para valores diarios.

Estos resultados son concordantes con los mostrados por Duffie y Beckman (1974) a partir de Liu y Jordan (1960). En la Figura 4 se muestra comparativamente los resultados obtenidos por Collares-Pereira y Rabl (1979) y Erbs *et al.*(1982).

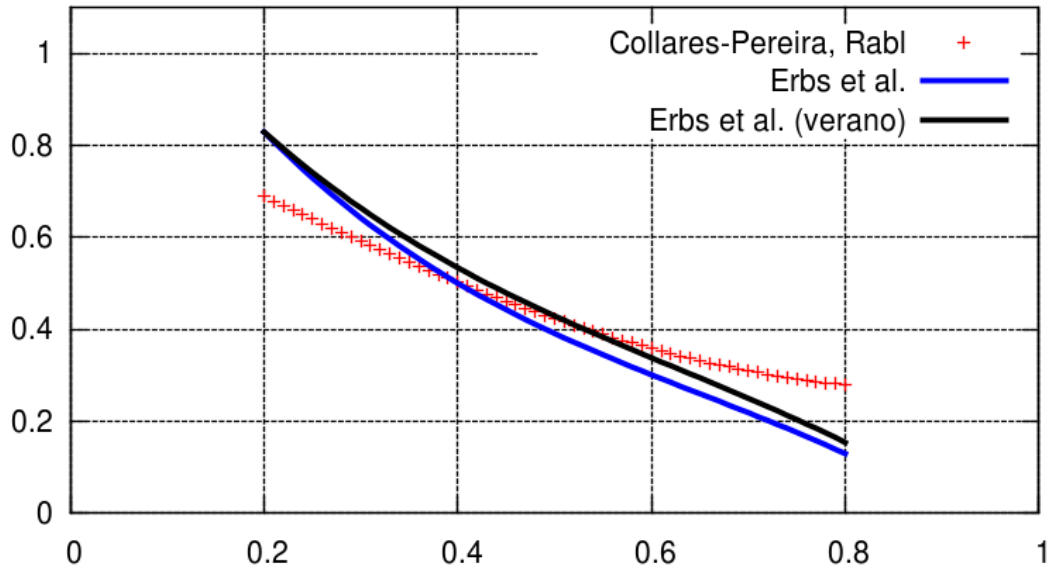


Figura 4: Correlaciones entre K_T y R_{DIF}/R_G según Collares-Pereira, et al y Erbs, et al.

Se estudia la correlación entre R_{DIF}/R_G y K_T considerando los valores horarios, con la base de datos de todo el año, ya que se verifica un comportamiento similar de la correlación para todos los meses. Se conforma la base de datos considerando los 12 meses del año y se establece la correlación que se muestra en la Figura 5.

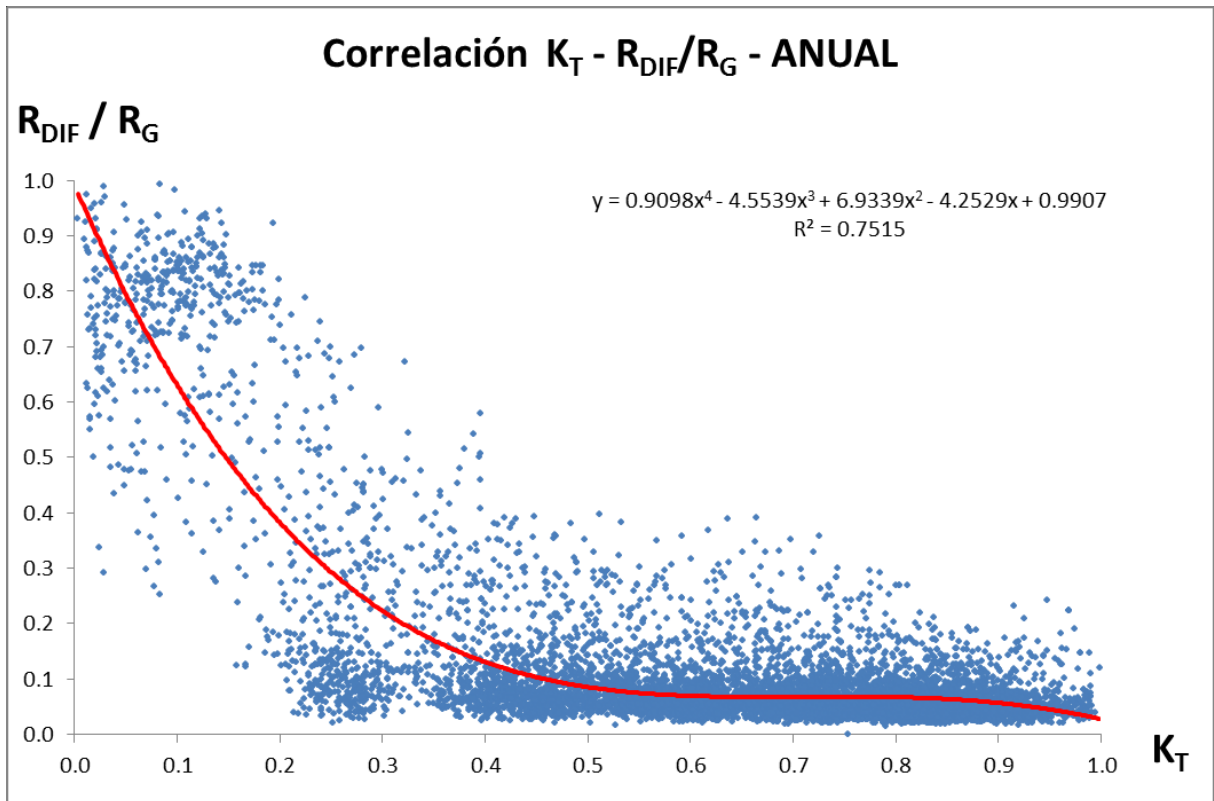


Figura 5 Gráfica de correlaciones entre K_T y R_{DIF}/R_G correspondiente a valores horarios

Finalmente se realiza la correlación R_{DIF}/R_G y K_T para los valores diarios con la base de datos de los 12 meses del año, la que se muestra en la Figura 6.

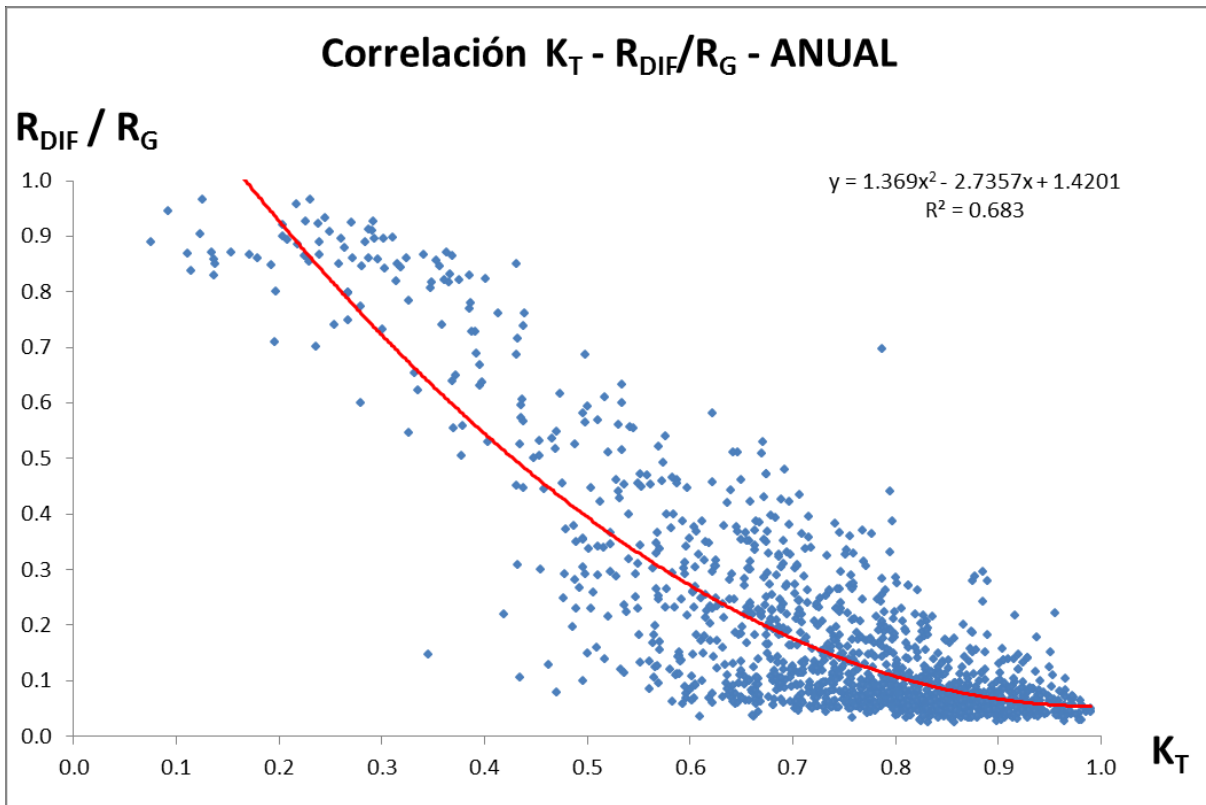


Figura 6 Gráfica de correlaciones entre K_T y R_{DIF}/R_G correspondiente a valores diarios.

Del análisis de las Figuras 6 y 7 se verifica nuevamente lo detectado para valores mensuales; los valores diarios “esconden” los momentos de nubosidad, siendo más representativa la correlación con valores horarios, motivo por el cual se adopta como definitiva su ecuación de ajuste, es decir:

$$R_{DIF}/R_G = 0.9098(K_T)^4 - 4.5539(K_T)^3 + 6.9339(K_T)^2 - 4.2529(K_T) + 0.9907 \quad (2)$$

CONCLUSIONES

Al considerar las correlaciones entre las variables K_T y R_{DIF}/R_G para todos los meses del año se detecta una gran cantidad de días con elevado K_T y bajos valores de R_{DIF}/R_G . Esto refleja y confirma la elevada cantidad de días despejados, característica climática del área de estudio.

En el análisis de los valores totales diarios se detecta que se reducen casi totalmente los días con valores bajos de K_T y elevados valores de R_{DIF}/R_G . Esto se debe a la “presión” que ejercen los valores elevados de radiación en los momentos en que el cielo se despeja, elevando los totales diarios. En consecuencia se estima conveniente utilizar la correlación entre valores horarios, los que reflejan todos los registros y no esconden los momentos de cielo nublado.

El coeficiente de determinación en el caso de considerar los valores horarios es concordantemente más elevado en relación al estudio de correlación con valores diarios. Esto fortalece la recomendación de trabajar con valores horarios en lugar de valores totales diarios.

La correlación horaria considerando todos los valores del período presenta un comportamiento similar al que se verifica para cada mes del año, con un adecuado coeficiente de correlación.

REFERENCIAS

- Collares-Pereira M. and Rabl A. (1979) The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 22, 235.
- Duffie J. and Beckman W. (1974). "Solar Energy Thermal Process". Ed. John Wiley & Sons. New York.
- Erbs D., Klein S. and Duffie J. (1982) Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28, 293.
- El-Sebaili A. and Terabia A.. (2003) Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Egypt. *Energy Conversion & Management*, Vol. 44. Pag. 2471-2482
- Liu y Jordan (1960) "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation" *Solar Energy*, Volume 4, Issue 3, Pages 1-19. ISSN 0038-092X
- Ortega A., Montilla E., Cúnsulo M. (2013) Clima urbano árido - Base de datos para estudios del Área Metropolitana de San Juan. AVERMA. Volumen 1. 2013 ISSN 978-987-29873-0-5; Págs. 11.29 a 11.36.
- Papparelli A., Cúnsulo M. (2005) Bloqueador de radiación solar. AVERMA ISSN: 0329-5184; Volumen 9, Págs. 09.13 a 09.18.
- Plasencia E., Matos L., Posadas A., Cabrera C. (2007) "Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre" *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. Vol 16 N° 19. ISSN (electrónico) 1561-8097
- Raichijk, C. (2012). Control de calidad de mediciones de radiación solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16. ISSN 0329-5184
- Riendl D., Beckman W. and Duffie J. (1990), Diffuse Fraction Correlations, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-7.
- Ulgen K., Hepbasli A. (2009). Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. *Energy Conversion and Management*; Vol. 50(1); 149-156.
- Wu G., Liu Y., Wang T. (2007). Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data – A case of study in Nanchang station, China. *Energy Conversion and Management*; Vol. 35: Pag.2447-52.
- Younes S., Claywell R., Muneer T. (2005) Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches. *Energy* 30, 1533–1549.

ABSTRACT: The objective of the present study is the determination of the correlation between R_{DIF}/R_G and clarity index K_T in an arid urban area. Records of R_{DIF} and R_G obtained from 1995 to the year 2011 are used. The correlations by discarding values for sunrise and sunset are studied. The results obtained are consistent with the literature. The remarkable number of days cleared for the area of study, particularly in the warm season it is verified. Analyses of hourly values reflect more accurately the specific situations of cloudiness.

Key words: diffuse solar radiation, global solar radiation, clarity index, arid zones.