

Investigando variaciones aleatorias de radiación solar en Guadalajara, México

Rubén Sánchez Gómez¹, Gilberto Rubén Aguirre Salas², Silvia Sánchez Díaz³ y Jaime Alcalá Gutiérrez⁴
Departamento de Física¹, Instituto de Astronomía y Meteorología^{2,4}, Departamento de Ciencias Naturales y Exactas³
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco; México
rubensg@cencar.udg.mx, raguirre@astro.iam.udg.mx, silviasandi@profesores.valles.udg.mx

Abstract— This paper aims to describe the stochastic variation of solar radiation time series observed in the metropolitan zone of Guadalajara. We use an 11-year (2003-2014) database of measures every ten minutes on two automatic stations, the first one installed in an urban area, within the city and the second one in forest area. We review separately the seasonal variation, time-dependent effect on consecutive observations, and temporal variations of short and long term. In long-term variations we found solar radiation dimming effect in the urban area and in short-term variation we found that the Weibull distribution model shows good fit to the observed data in the study area.

Keyword— *Time series analysis, seasonal variation, long-term trend, short-term variations, probability model.*

Resumen— Este trabajo tiene como objetivo describir la variación estocástica de series temporales de radiación solar observada en la zona metropolitana de Guadalajara. Se utiliza una base de datos de once años de lecturas cada diez minutos registradas en dos estaciones automáticas, la primera en un área urbana, al interior de la ciudad y la segunda en una área forestal. Se revisaron por separado efectos periódicos, dependencia temporal en lecturas consecutivas, y variaciones a corto y largo plazo. En las variaciones a largo plazo se encontró evidencia de oscurecimiento en el área urbana, mientras que en las de corto plazo, se encontró que el modelo de distribución Weibull muestra un buen ajuste a los datos observados en la zona de estudio.

Palabras claves— *Análisis de series de tiempo, variación estacional, tendencia a largo plazo, variaciones a corto plazo, modelo de probabilidad.*

I. INTRODUCCIÓN

La radiación solar es una de las fuentes energéticas de origen renovable más importante, que además de ser una de las mejores alternativas para reducir el impacto ambiental ante el uso indiscriminado de recursos convencionales (SENER, 2013; REN21, 2014), se ha convertido en una fuente atractiva y rentable con el desarrollo de colectores fotovoltaicos cada vez más potentes. No obstante, cualquier inversión en aplicaciones de energía alternativa requiere de una estimación confiable del recurso solar esperado en el punto de interés (Gueymard y Wilcox, 2011; Vignola, Grover, Lemon y McMahan, 2012), ya que la radiación solar está sujeta a variaciones impredecibles pues una parte importante puede ser absorbida o dispersada por moléculas del aire como aerosoles o nubes, mientras que otro porcentaje se recibe directamente en los colectores fotovoltaicos. Por tanto, conocer y comprender la variabilidad de la radiación solar a corto plazo es de vital importancia para contar con los elementos que permitan estimar el potencial de cualquier sistema que convierta a la radiación solar en energía.

Para entender la importancia de estos cambios impredecibles, se debe señalar que la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos no se puede estimar utilizando lecturas horarias. Trabajos como el de Soubdhan, Emilion y Calif (2008) muestran que las discrepancias en intervalos de corto plazo son decisivas en las diferencias observadas en estudios de simulación. Más aún, estas variaciones pueden alcanzar hasta 700W/m^2 en intervalos de tiempo de algunos segundos a minutos, por las condiciones adversas que interfieren el flujo de radiación solar, tales como nubosidad, tamaño de la nube, velocidad de traslado o número de nubes, entre otros casos, y estas fluctuaciones repercuten negativamente en el

desempeño de los colectores que convierten la radiación solar en electricidad. Más aún, para climas tropicales se incrementa la complejidad de estos sistemas que interactúan en la atmósfera, generando escenarios impredecibles en las variaciones de radiación solar a corto plazo, por cambios bruscos en las condiciones meteorológicas locales.

Entender esta componente impredecible de la radiación solar ha sido de interés en diversos trabajos, destacando el uso de familias de probabilidad o mezclas de distribuciones con soporte no negativo, implementado directamente a los datos o a bien usando alguna transformación. Por ejemplo, Assunção, Escobedo y Oliveira (2003) modifican los datos de radiación solar en un índice de difusión y le ajustan una distribución Beta a registros observados en el área de Botucatu, Brasil; presentan además un análisis detallado del índice para diferentes rangos en $[0,1]$; y en otro caso, Soubdhan, Emilion y Calif (2008) combinan distribuciones Dirichlet investigando el comportamiento diario de un índice de claridad. No obstante, en ambos trabajos se argumenta un desempeño bimodal en la distribución de las observaciones de radiación, señalando que tal comportamiento se puede atribuir a lecturas por bloques de registros con cielo despejado contra escenarios con atmósfera difusa.

Por otro lado, Jurado, Caridad y Ruiz (1995) investigan los registros de radiación solar y detectan de forma semejante un comportamiento bimodal en la distribución de los datos para intervalos menores a 60 minutos y por su parte, Chang (2010) analiza de forma similar lecturas observadas en seis estaciones meteorológicas instaladas en Taiwan, con el fin de encontrar un modelo de probabilidad que tenga el mejor ajuste a los datos. Hace un análisis comparación del desempeño de las distribuciones Weibull, logística, normal y lognormal, sin detectar un comportamiento binomial en la distribución de los datos observados. Esta diferencia en el desempeño de los datos, entre binomial y no binomial, deja duda respecto a la metodología utilizada, dando apertura a buscar una herramienta diferente que permita investigar las variaciones impredecibles de radiación solar con técnicas de aproximación que permitan el análisis de las características típicas de cualquier magnitud observada en la naturaleza.

Bajo este contexto y desde un punto de vista práctico, es natural pensar que para cualquier conjunto de datos observados en la naturaleza, si el grado de incertidumbre es muy pequeño, los modelos numéricos determinísticos son suficientes para analizar su desempeño, si el grado de desorden es suficientemente grande, lo usual es implementar modelos probabilísticos clásicos, no obstante, si los datos muestran evidencia de patrones complejos como variaciones a corto plazo, interdependencia en lecturas consecutivas, efectos estacionales o periódicos y variaciones a largo plazo, las técnicas determinísticas convencionales son ineficientes y la estadística convencional es insuficiente. Es entonces cuando el análisis de series temporales es el campo de acción.

De esta forma, el propósito de este trabajo es aplicar las herramientas estadísticas del análisis de series de tiempo para caracterizar los registros de radiación solar observados en la zona de estudio, analizando por separado las características típicas de cualquier serie meteorológica, como lo son: efectos estacionales, variaciones a largo plazo, dependencia temporal y variaciones a corto plazo.

A. Características de la zona de estudio

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) está integrada por los municipios interiores de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga y El Salto, adicionando a Ixtlahuacán de los Membrillos y Juanacatlán como municipios exteriores (Delimitaciones de las zonas metropolitanas de México, 2005), concentra a más del 50% de la población del estado y ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas.

Geográficamente, se sitúa en la cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá, entre las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Transmexicano. Se localiza en la región centro – occidente del país, en el centro del estado de Jalisco, a una latitud y longitud promedio de $20^{\circ} 39' 54''N$ y $103^{\circ} 18' 42''E$, respectivamente,

y una altitud promedio de 1,540 metros sobre el nivel medio del mar, lo que la expone a la influencia de sistemas anticiclónicos generados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico (figura 1).



Fig. 1. Localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

Está dentro del llamado cinturón tropical, por lo que la mayor parte del año se encuentra afectada por la afluencia de aire marítimo (Programa para mejoramiento la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001) y recibe una abundante radiación solar debido a su latitud $20^{\circ}N$, ubicándose en el llamado “cinturón solar” de energía y sometida a una radiación solar que va de 5.6 a $6.1KWh/m^2$ (IBP, 2015). De esta forma, el clima en la ZMG se puede clasificar como semicálido (climas de transición entre cálidos y templados), subhúmedo, con temperatura anual promedio por encima de los $18^{\circ}C$ y con periodos marcados de lluvias y pocas lluvias (Davydova et al., 1999). Entonces, la ZMG representa un punto de interés para investigar variaciones a corto plazo en los registros de radiación solar, esperando encontrar perturbaciones atribuibles a condiciones típicas de patrones complejos de variación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Al interior de la ZMG se cuenta con dos estaciones meteorológicas automáticas tipo Davis, modelo Vantage Pro2: la primer estación esta instalada en el interior del Observatorio “Colomos”, ubicado al interior del Parque Colomos, en una zona boscosa, semiurbanizada, a una longitud de $-103^{\circ} 23' 33''N$, latitud $20^{\circ} 42' 24''E$ y a una altitud de $1559m$ sobre el nivel medio del mar. Está a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA), que provee información al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Por otro lado, la segunda estación se encuentra instalada en un ambiente urbanizado, al interior del Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM) de la Universidad de Guadalajara, a una longitud de $-103^{\circ} 23' 03''N$, latitud $20^{\circ} 40' 29''E$ y a una altitud de $1592m$ sobre el nivel medio del mar (figura 2).

Ambas estaciones generan registros cada diez minutos de temperatura (promedio, mínima y máxima), humedad relativa, punto de rocío, precipitación, dirección – velocidad del viento y radiación, entre otras. Utilizan un radio intercepción de espectro amplio de frecuencia y son capaces de recibir hasta $300m$ de distancia, los sensores de temperatura y radiación solar se ubican dentro de un protector solar, por lo que se tiene fiabilidad y precisión en sus lecturas. Se alimenta de energía eléctrica, pero

cuentan con un sistema de alternativo de tres baterías que funcionan como reserva durante cortos breves de energía; no obstante, ambas estaciones tienen problemas de lecturas perdidas desde su instalación.

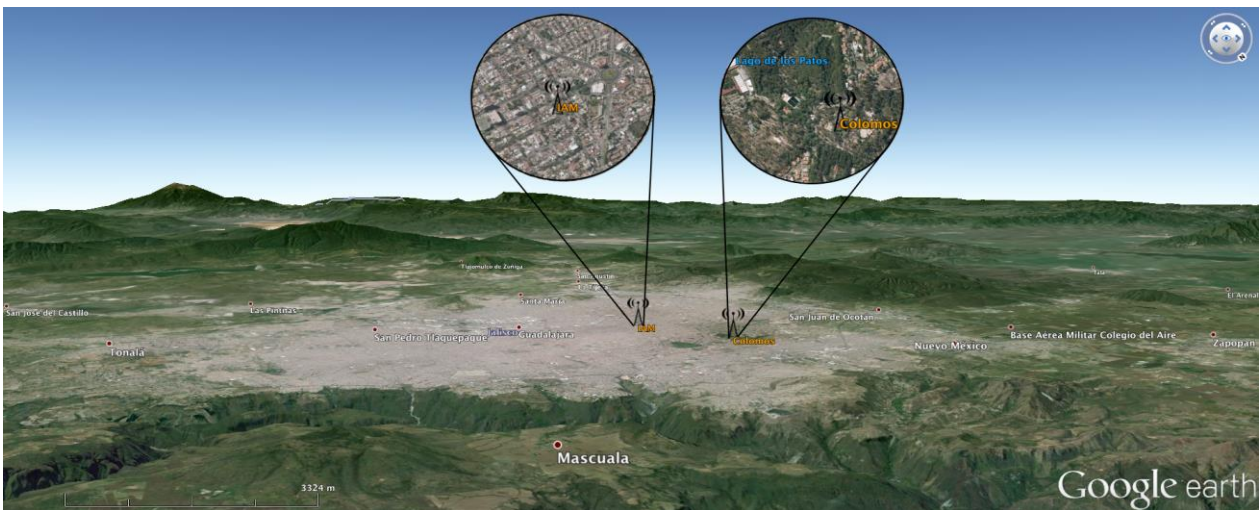


Fig. 2. Estaciones meteorológicas en la Zona Metropolitana de Guadalajara: Observatorio Colomos y el IAM.

Las series de datos disponibles van desde el 28 de febrero del 2000 para la estación del observatorio Colomos, mientras que los registros en la estación del IAM inicia el 23 de junio del 2003, ambas series muestran periodos largos de datos perdidos (figura 3).

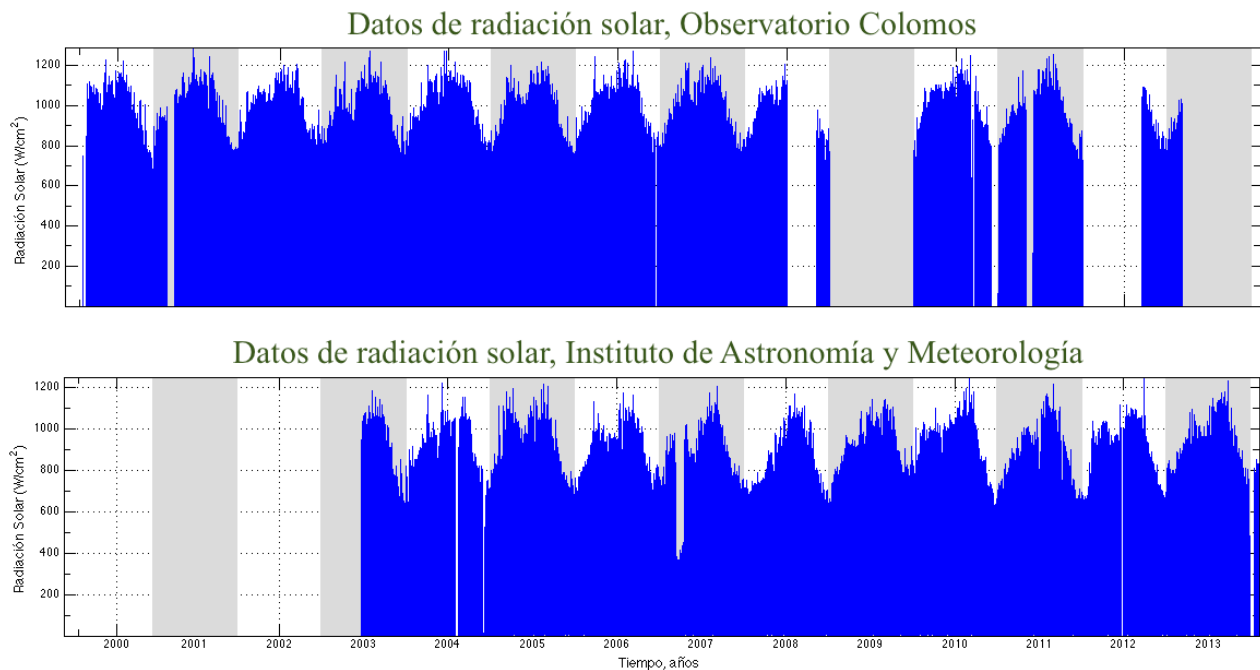


Fig. 3. Datos de Radiación Solar.

De este modo, en este trabajo se muestran los resultados obtenidos con las bases de datos de ambas estaciones, desde sus fechas respectivas de inicio hasta el siete de marzo de 2013, fecha en que no se

cuenta con datos de la estación del observatorio Colomos, teniendo una muestra de once años de información en promedio.

A. Análisis de series de tiempo

La metodología utilizada se fundamenta en el término de *series de tiempo*, que básicamente se refiere a una rama de la estadística en donde se estudian observaciones recolectadas de forma secuencial en puntos temporales igualmente espaciados, pero pueden ser lecturas en periodos de tiempo diferentes (Smith, 1999; Brockwell y Davis, 2002), de modo que se analizan las lecturas $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, observadas en puntos discretos de tiempo $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ con $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$.

Desde un punto de vista más generalizado, cualquier serie de tiempo es una *realización* de un *proceso estocástico*, definido por una magnitud $X(t, w)$ que depende de una variable determinística t (no muestra cambios impredecibles) y una variable aleatoria w impredecible. Por tanto, para un punto arbitrario en el tiempo, el valor x_t observado en el momento t es una magnitud aleatoria que sigue una función de probabilidad $p_t(x_t)$, con media $\mu(t)$ y autocovarianza $\gamma(h)$ dados por:

$$\begin{aligned} \mu(t) &= E[X_t] & (1) \\ \gamma(h) &= \text{Cov}\{(X_t - m_t)(X_{t+h} - m_{t+h})\}. \end{aligned}$$

en donde h representa un incremento de tiempo ($h \geq 0$) y tanto la función de probabilidad $p_t(x_t)$ como la media y la autocovarianza pueden ser diferentes para cada punto de tiempo t . Además, el caso particular en que $h = 0$ (no hay incremento en el tiempo) corresponde a la varianza de la variable aleatoria w observada en un tiempo t específico y se escribe como $\gamma_0 = \gamma(0)$.

1) Investigando Tendencia en series de tiempo

Si el valor de la media $\mu(t)$ crecer o decrece a largo plazo, se dice que la serie muestra efectos de tendencia temporal y sin pérdida de generalidad, se puede representar mediante el modelo aditivo

$$X_t = T_t + I_t$$

en donde T_t corresponde a tendencia e I_t representa la componente impredecible; Además, en el caso más simple, se puede suponer un modelo de tendencia determinística lineal, dado por

$$T_t = m + a t \quad (2)$$

de modo que el problema se reduce a resolver el sistema (2) para los valores discretizados de tiempo $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ y cuya solución se puede obtener mediante mínimos cuadrados (Rohatgi, 2005; Sánchez *et al.*, 2010). De modo que, si los datos de radiación solar observados en la zona de estudio muestran efectos de tendencia, se tendrá que el valor estimado de a con los datos deberá ser diferente de cero con cierto nivel de confianza.

2) Investigando efectos estacionales en series de tiempo

Para analizar efectos estacionales, la herramienta básica es el *análisis espectral*, *análisis armónico* o *análisis de Fourier*, de la serie de tiempo. Es un instrumento estadístico que permite descomponer la información disponible en una suma de funciones trigonométricas

$$X_t = \mu + A_i \cos 2\pi f_i t + E_i \sin 2\pi f_i t + I_t \quad (3)$$

para $i = 1, 2, \dots, n/2$ y en donde los A_i y E_i son amplitudes, las f_i son frecuencias y μ es el valor promedio de los datos. En donde, para una serie de tamaño n , el análisis de efectos estacionales consiste

en encontrar las periodicidades “ocultas”, suponiendo frecuencias enteras que corresponden a periodos n/j con $j = 1, 2, \dots, n$. Estos armónicos respecto a la expansión de datos $f_j = j/n$ se conocen como frecuencias de Fourier (Bloomfield, 2000) de modo que, las únicas frecuencias que deben considerarse son aquellas que satisfacen $0 < f < 1/2$, ya que se repiten en ambos lados del eje de frecuencias (sección 2.5, Bloomfield, 2000).

Así, bajo este argumento el estimador más simple para densidades espectrales es el periodograma, dado por

$$I(f_j) = n R^2(f_j) \tag{4}$$

con $R^2(f_j) = (\hat{A}_j^2 + \hat{E}_j^2)$ y bajo la hipótesis nula $A_j = E_j = 0$ se tiene que $I(f_j) \sim 4\sigma^2$ se distribuye exponencial con media uno (Smith, 1999; Bloomfield, 2000; Sánchez *et al.*, 2010).

Implementando entonces esta herramienta en los datos de radiación solar, se puede esperar obtener frecuencias significativas para efectos estacionales diarios, semianuales (efectos de temporal), anuales (efectos globales a gran escala).

3) Investigando dependencia en lecturas consecutivas

En consistencia con los modelos lineales, es común establecer alguna medida de asociación entre lecturas consecutivas mediante el coeficiente de auto-correlación γ_h para $h = 1, 2, \dots, k$ retrasos y mostrar evidencia de asociación entre la lectura x_t y los retrasos previos $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-k}$, bajo el supuesto de que la lectura actual depende en cierta medida de los registros previos, de modo que un modelo que incorpora esta asociación temporal está dado por

$$X_t = a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_k X_{t-k} + I_t \tag{5}$$

en donde se busca verificar la hipótesis $a_1 = 0, \dots, a_k = 0$ contra la alternativa $a_1 \neq 0, \dots, a_k \neq 0$, para los datos de radiación solar observados en la zona de estudio.

Cabe señalar que la ventaja de suponer modelos lineales en cada uno de los efectos típicos de series temporales (tendencia, estacionalidad, asociación con lecturas previas) permite estimar los parámetros mediante mínimos cuadrados y eliminar los efectos significativos mediante restas simples de modo que, en (5) se tendría el efecto impredecible restando los retrasos significativos, es decir

$$I_t = X_t - a_1 X_{t-1} - a_2 X_{t-2} - \dots - a_k X_{t-k}$$

y así, se puede investigar el comportamiento de la componente impredecible I_t eliminando los efectos de tendencia, estacionales y de dependencia entre lecturas consecutivas.

B. Modelos probabilísticos de soporte no negativo

Revisando la literatura, Karaki *et al.* (1999) muestra un estudio probabilístico del desempeño de sistemas de conversión de energía solar suponiendo un modelo *beta* de soporte $[0,1]$ y considera que la función de densidad Weibull representa adecuadamente los datos de velocidad del viento; Assunção Escobedo y Oliveira (2003) señalan que la densidad *beta* es un modelo adecuado para analizar la componente irregular de datos de radiación solar en Botucatu, Brasil; Chang (2010) en cambio, un poco más precavido, muestra un análisis en el que incorpora la densidad Weibull, la normal, la logística y la log-normal en su estudio, concluyendo que la densidad log-normal muestra mejor desempeño en términos de error cuadrado medio y de la prueba Kolmogorov-Smirnov; mientras que Villanueva *et al.* (2013) evalúa el desempeño de la distribución Weibull multivariada para representar de manera conjunta la dirección y la velocidad del viento. Lamentablemente, ninguno de estos trabajos dan evidencia de eliminar o incorporar efectos de tendencia o periodicidad en las series temporales que analizaron; más

aún, los histogramas que muestran en sus trabajos dan evidencia de un comportamiento bimodal en los datos o de bien, con densidades de colas muy pesadas, lo que deja evidencia del efecto de componentes cíclicas en los datos. Así, en un paso previo, en este trabajo se reducen los efectos significativos de tendencia temporal, estacionalidad y dependencia temporal, y una vez que se tenga únicamente la variación impredecible o aleatoria, se implementan cinco modelos de soporte no negativo en las bases de datos de radiación solar en la zona de estudio. En específico los modelos que se analizan son:

- Densidad *beta generalizado 1er tipo* con densidad de probabilidad (Aguirre, 2016)

$$\beta G_X(x; a, b) = x^{a-1} [c-x]^{b-1} / [c^{a+b-1} B(a, b)],$$

para $a, b > 0$, $0 < x < c$ y el término $B(a, b)$ es la *función beta* definida por $B(a, b) = \{\Gamma(a)\Gamma(b)\} / \Gamma(a+b)$, en donde $\Gamma(\bullet)$ es la *función gamma* (Lawless, 2002).

- El *exponencial*, con densidad de probabilidad

$$f_X(x; a) = \exp(-x/a) / a,$$

para $a > 0$, $x > 0$ (Johnson, Kotz y Balakrishnan, 1994; Lawless, 2002; Rohatgi, 2003; Aguirre, 2016).

- La densidad *gamma*, cuya densidad de probabilidad se escribe como

$$f_X(x; a, b) = x^{a-1} \exp(-x/b) / [\Gamma(a) b^a],$$

para $a, b > 0$, $x > 0$ (Johnson, Kotz y Balakrishnan, 1994; Lawless, 2002; Rohatgi, 2003; Aguirre, 2016).

- El *lognormal*, dado por

$$f_X(x; a, b) = [x (2\pi)^{1/2} b]^{-1} \exp(-[\log(x) - a]^2 / [2\sigma^2]),$$

para $\sigma > 0$, $x > 0$ (Johnson, Kotz y Balakrishnan, 1994; Rohatgi, 2003; Aguirre, 2016).

- El modelo *Weibull*, con densidad de probabilidad

$$f_X(x; a, b) = ab(ax)^{b-1} \exp(-[ax]^b),$$

para $a, b > 0$, $x > 0$ (Johnson, Kotz y Balakrishnan, 1994; Rohatgi, 2003; Aguirre, 2016).

1) Criterios de bondad de ajuste

Para identificar el modelo de probabilidad con mejor ajuste a un conjunto de datos, en la literatura estadística se han propuesto varias medidas, entre las que destacan el criterio de información de Akaike (AIC_C), que proporciona una estimación de la información relativa que se pierde con un modelo específico; de modo tal que, el mejor será aquel que presente el menor valor del AIC_C para los datos. Está dado por

$$AIC_C = -2\ln(L(\hat{a})) + 2Kn/(n - K - 1),$$

en donde \hat{a} corresponde al estimador paramétrico de a , n es el tamaño de la muestra, K es el número de parámetros que tiene el modelo que se analiza y L es la log-verosimilitud evaluada en los parámetros estimados.

Otro criterio de uso cotidiano es la Raíz cuadrada del Error Cuadrado Medio ($RECM$), dada por

$$RECM^2 = \frac{[x_1 - x_{1.est}]^2 + [x_2 - x_{2.est}]^2 + \dots + [x_n - x_{n.est}]^2}{n},$$

en donde x_t son los registros observados en el tiempo t , $x_{t.est}$ es el valor puntual estimado para el modelo a prueba y n es el tamaño de la muestra. En este caso, dado que se trata de distancia, el mejor modelo para los datos será aquel que tenga el valor más pequeño.

III. RESULTADOS

Analizando las series temporales de radiación solar en la ZMG, una observación general en lo que respecta al efecto de tendencia, es que los datos no dan evidencia para afirmar algún efecto significativo. Sin embargo, destaca que aplicando el modelo (2), se tiene que para la zona boscosa o semiurbana $\hat{a}_{Colomos} = 0.000010653$, es decir, en se observa un efecto de brillantés (se incrementa la cantidad de radiación recibida en superficie por unidad de tiempo), mientras que para la zona urbanizada se observa un efecto de obscurecimiento con $\hat{a}_{IAM} = -0.000014071$ (se reduce la cantidad de radiación recibida en superficie por unidad de tiempo). Este último resultado coincide con reportes de autores como Pinker, Zhang, Dutton (2005), Ye, Li, Sun y Guo (2009), quienes señalan un efecto llamado como “*obscurecimiento global*”, asociado fuertemente al cambio climático. No obstante, detectar obscurecimiento en una zona urbana y brillantés en la zona boscosa, a menos de cinco kilómetros de distancia, puede reflejar la influencia de niveles elevados en la concentración de contaminantes como el ozono o partículas menores a $10\mu m$ en la ZMG y sobre el IAM (Sánchez *et al.* 2015).

Revisando los efectos estacionales en ambas series de tiempo, se tiene evidencia de frecuencias significativas a 12 ($f_1=0.01389$) y 24 horas ($f_2=0.006948$), 15 ($f_3=0.000463$) y 30 días ($f_4=0.000231$) y de aproximadamente 6 meses ($f_5=0.000038$) con un intervalo de confianza del 95%. En éste caso, en las gráficas de la figura 4 se pueden observar dos representaciones de periodogramas estimados para las dos series disponibles, en ellas se incluyen los intervalos de confianza respectivos, destacando la evidencia de frecuencias significativas.

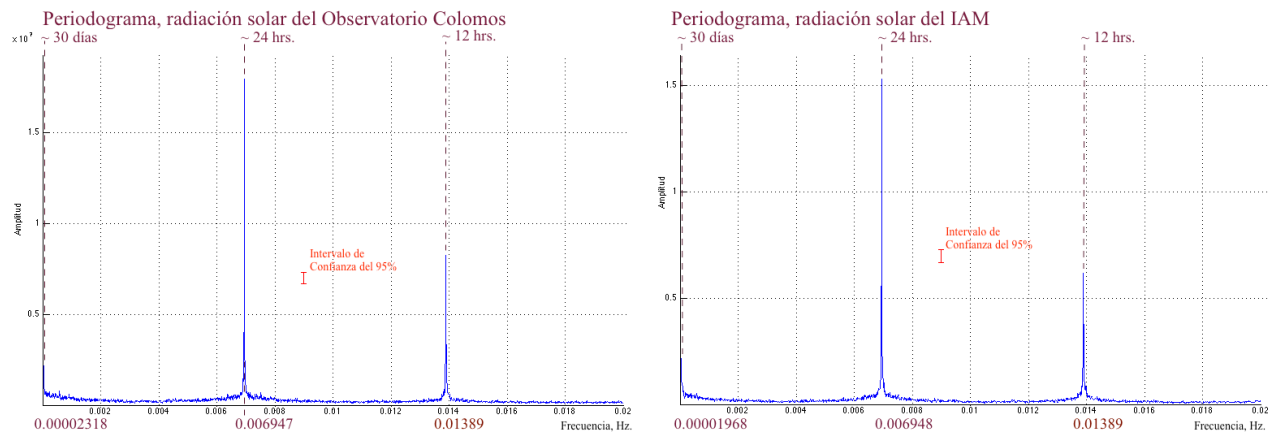


Fig. 4. Periodogramas estimados con los datos de radiación solar observados en el Observatorio Colomos y en el IAM.

Una vez identificadas los periodos significativos, el siguiente paso es aplicar un filtro para eliminar los efectos estacionales y en este caso, se pueden suprimir aquellas menores a $0.014Hz$ y con ello retirar el efecto en las ambas series de datos. Así, se rescata la variación impredecible reduciendo los efectos periódicos y de tendencia temporal.

En un paso siguiente, para verificar evidencia de efectos de asociación entre lecturas consecutivas, en la figura 5 se pueden observar los coeficientes de auto-correlación estimados para ambas series temporales de radiación solar. Destaca principalmente que para retrasos de diez minutos, la correlación estimada en ambas estaciones es menor a 0.60 y además, en observaciones horarias la auto-correlación estimada es menor a 0.45, lo que hace suponer que la asociación entre lecturas consecutivas no es un factor relevante para las magnitudes impredecibles de las series.

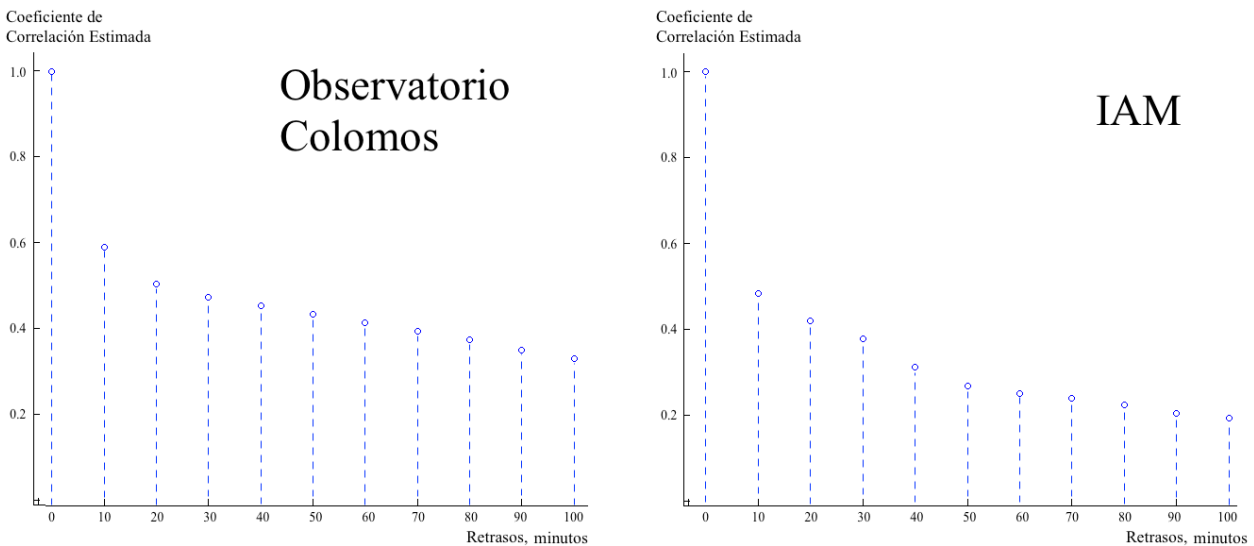


Fig. 5. Periodogramas estimados con los datos de radiación solar observados en el Observatorio Colomos y en el IAM.

Aplicando los modelos en las variaciones aleatorias de las series una vez que se suprimieron los efectos estacionarios y de tendencia temporal, en la tabla 1 se presentan los AIC_C y las $RECM$ estimados con los datos de radiación solar para los cinco modelos propuestos.

En este caso se puede observar que bajo el criterio de la $RECM$, los datos dan evidencia para creer que el modelo *lognormal* es el mejor para los datos en las estaciones disponibles (valores sobresaltados); en tanto que, el modelo *beta generalizado* de 1er tipo es el que muestra el peor desempeño de los modelos implementados. No obstante, se debe señalar además que el modelo *lognormal* representa el peor escenario en términos del AIC_C , ya que es el que pierde más información relativa a los datos entre los cinco modelos revisados en este trabajo.

Por otro lado, en la misma tabla I se puede ver que con base en el AIC_C , el modelo *Weibull* es el que pierde menos información relativa en contraste con los cuatro modelos de prueba (valores sobresaltados) y sobresale además que de las estimaciones de $RECM$ el modelo *Weibull* es la segunda mejor alternativa. Por lo que, este resultado deja una pauta importante para decidirse por el modelo más apropiado para los datos disponibles en la ZMG.

Tabla I. Criterio de información de Akaike y raíz del error cuadrado medio estimados para los datos de radiación solar.

Modelo	Criterio de información de Akaike y Raíz del Error Cuadrado Medio.			
	Datos registrados en el Observatorio Colomos		Datos registrados en el Instituto de Astronomía y Meteorología	
	AIC_C	$RECM$	AIC_C	$RECM$
Beta Generalizado de 1er tipo	2687025.4877	0.007492749788821	2655112.6546	0.003826120713519
Exponencial	2700486.3486	0.000000000005597	2658977.7893	0.00000000024735
Gamma	2677856.0570	0.00000000000608	2644892.2622	0.00000000005476
Lognormal	2719489.3963	0.00000000000060	2669380.8834	0.00000000000059
Weibull	2673318.3623	0.00000000000193	2639191.6490	0.00000000000675

Buscando reforzar las observaciones de la tabla 1, en las figuras 6 y 7 se pueden observar las gráficas del histograma de la magnitud impredecible en los datos de radiación solar registrados en las estaciones del observatorio Colomos, a manera de ejemplo, incorporando los ajustes de los modelos propuestos. En donde sobresale el modelo *lognormal* por su proximidad al histograma de los datos, pero el modelo Weibull es la segunda mejor alternativa en contraste con los modelos bajo estudio.

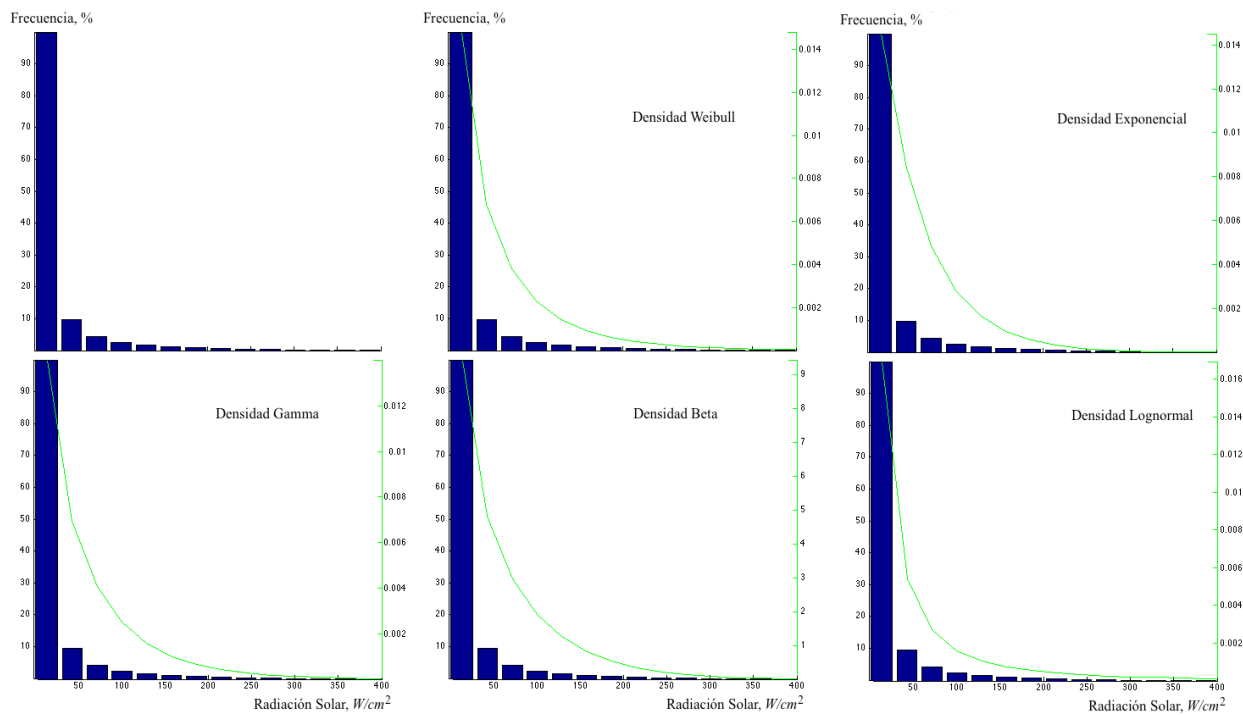


Fig. 6. Modelos propuesto e histograma de las variaciones aleatorias registradas en el observatorio Colomos.

Cabe señalar que en ambas figuras se pueden identificar ejes verticales en color verde, que corresponden a las magnitudes de las curvas estimadas con los datos para las densidades de probabilidad bajo estudio.

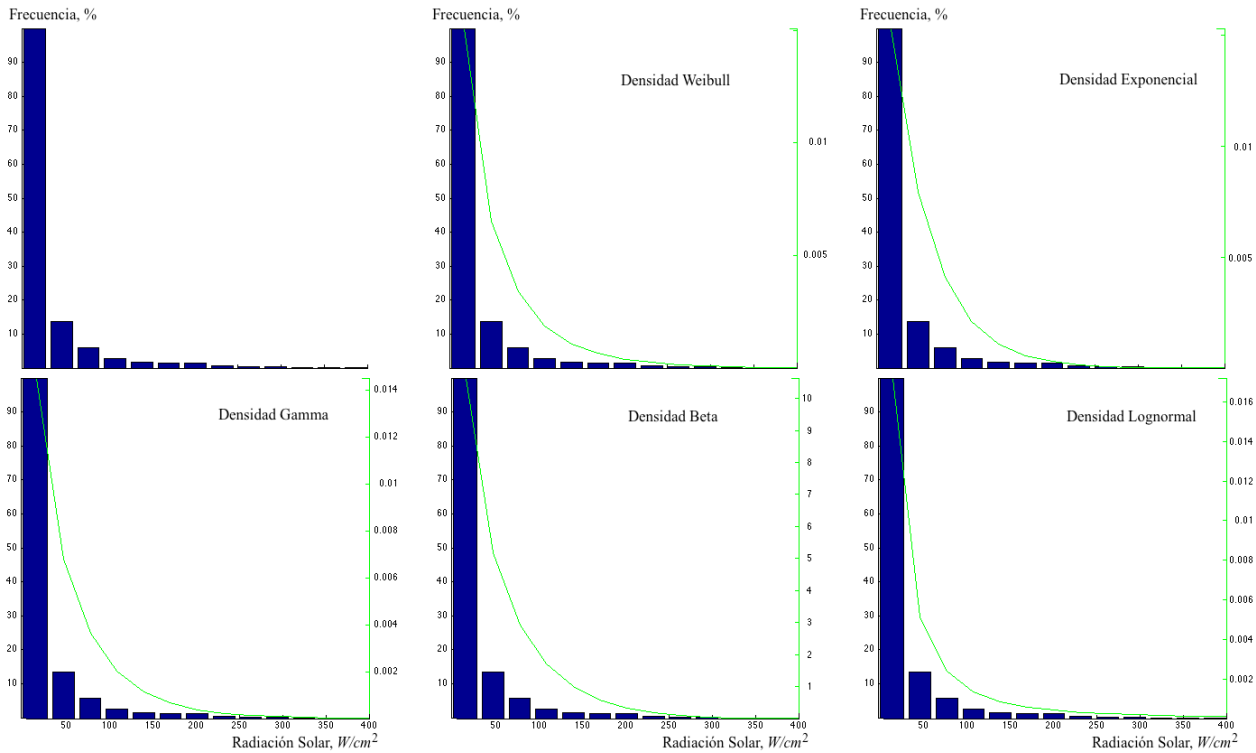


Fig. 7. Modelos propuesto e histograma de las variaciones aleatorias registradas en el IAM.

Sobresale además en los histogramas de las figuras 6 y 7 que no hay evidencia de un comportamiento binomial en las magnitudes aleatorias de las series de radiación solar observadas en la zona de estudio.

Por otro lado, a manera de ejemplo en la figura 7 se presenta el histograma de los datos sin suprimir los efectos periódicos y de tendencia en la serie observada, de modo que, en la gráfica se puede observar un comportamiento tipo bimodal en los datos, por lo que se concluye que este comportamiento se atribuye a la influencia de los efectos periódicos y de tendencia temporal en las series de datos.

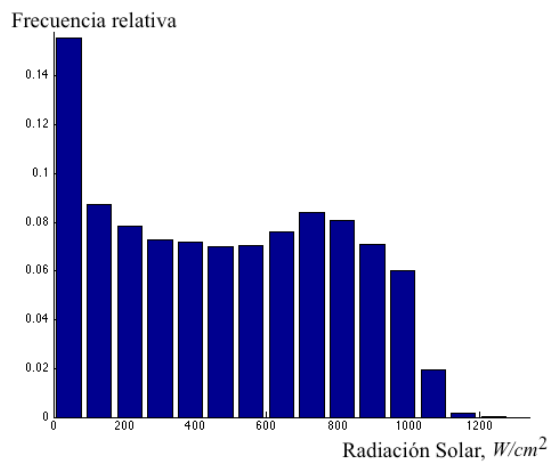


Fig. 8. Histograma de frecuencia de la serie de datos registrados en el observatorio Colomos.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una metodología para suprimir el efecto periódico, de tendencia temporal y de asociación entre lecturas consecutivas, con el fin de investigar de forma aislada las variaciones impredecibles o aleatorias en series temporales. Ésto permite entender el comportamiento de las series temporales de radiación solar en la zona, para disponer de los elementos de decisión necesarios para invertir en fuentes que aprovechen la energía solar.

Se probaron cinco modelos de densidad de probabilidad sugeridos en la literatura, en específico, los modelos *beta* (*beta generalizado de 1er tipo*), el *exponencial*, el modelo *gamma*, el *lognormal* y el *Weibull* y se hicieron pruebas de desempeño utilizando conjuntos de datos de radiación solar registradas en dos estaciones automáticas instaladas en la ZMG.

Los resultados dan evidencia para creer que el modelo *Weibull* es el mejor para entender el efecto impredecible en las series temporales de datos de radiación solar; aportando la menor pérdida de información en términos del AIC_C y ofreciendo la segunda mejora alternativa con base en la *RECM*.

Por otro lado, destacando de manera contundente que la variación impredecible no sigue un comportamiento bimodal en los datos registrados en la zona de estudio y este punto es relevante ya que se tienen elementos para afirmar que el comportamiento bimodal se puede atribuir a la influencia de los efectos periódicos y de tendencia temporal de las series.

Finalmente, el análisis de tendencia muestra un efecto decreciente en la intensidad de la radiación solar recibida en zona urbana, es decir, se tiene evidencia para creer que se presenta el fenómeno de “obscurecimiento” en el interior de la ciudad, posiblemente atribuible a los elevados niveles de contaminación atmosférica. En tanto que, para la zona boscosa (observatorio Colomos) se tiene evidencia de “brillantéz”, esto es, la tendencia temporal muestra un crecimiento moderado en la incidencia de radiación solar; esto coincide con los últimos reportes publicados en la literatura científica con datos de radiación solar registrados en otras regiones del mundo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren expresar su reconocimiento al apoyo brindado por el personal del Observatorio Colomos y del Instituto de Astronomía y Meteorología de la UdeG cuyas bases de datos son el sustento del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] SENER (2013) “Prospectiva de energías renovables 2013-2027”, Sec. de Energía, México. Recuperado en mayo 20 de 2014. www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_Energias_Renovables_2013-2027.pdf.
- [2] REN21 (2014) “Renewables 2014: Global Status Report”, Secretariat c/o UNEP, Paris. Recuperado en julio 15 de 2014, http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full.
- [3] C.A. Gueymard, S.M. Wilcox (2011) “Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data”, *Sol. Energy* 85(5), pp. 1068–1084.
- [4] F. Vignola, C. Grover, N. Lemon, A. McMahan (2012) “Building a bankable solar radiation dataset”, *Sol. Energy* 86(8), pp. 2218–2229.

- [5] T. Soubdhan, R. Emilion, R. Calif (2008) "Classification of daily solar radiation distributions using a mixture of Dirichlet distributions". Article soumis à Solar Energy. Recuperado en mayo 15 de 2014. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00289567/document>.
- [6] H.F. Assunção, J.F. Escobedo, and A.P. Oliveira (2003) "Modelling frequency distributions of 5 minute-averaged solar radiation indexes using Beta probability functions", *Theor. Appl. Climatol.*, 75, pp. 213–224.
- [7] M. Jurado, J.M. Caridad, V. Ruiz (1995) "Statistical distribution of the clearness index with radiation data integrated over five minute intervals", *Solar Energy*, 55, pp. 469–473
- [8] T.P. Chang (2010), "Investigation on Frequency Distribution of Global Radiation Using Different Probability Density Functions", *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, Vol. 8, No. 2, pp. 99–107.
- [9] GEJ/SEMARNAP/SS (1997) Gobierno del Estado de Jalisco, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría Salud, "Programa para mejoramiento la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001".
- [10] IBP (2015) "Mexico Energy Policy, Laws and Regulations Handbook Volume 1 Strategic Information and Basic Laws", International Business Promotion, Inc., ISBN:1312958766, 9781312958760, pp. 284.
- [11] V. Davydova, Y. Skiba, S. Bulgakov y A. Martínez (1999) "Modelación Matemática de los Niveles de Contaminación en la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, México. Parte I". *Microclima y Monitoreo de la Contaminación. Rev. Internacional de Contaminación Ambiental.* pp. 103–111.
- [12] R. L. Smith (1999) "Time Series", Department of Statistics, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599-3260, Version 1.0.
- [13] P. J. Brockwell, R. A. Davis (2002) "Introduction to time series and forecasting 2nd ed.", Springer-Verlag New York, Inc.
- [14] V. K. Rohatgi (2005) "An Introduction To Probability And Statistical, 2E", John Wiley & Sons Inc.
- [15] R. Sánchez, H. Calderón, J. Fregoso, E. Brito, M. Rujano, S. Sánchez (2010) "Análisis y estimación de datos perdidos en investigación aplicada", Editorial Universitaria, U. de G.
- [16] P. Bloomfiel (2000) "Fourier Analysis of Time Series", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [17] H. Karaki, R.B. Chedid, R. Ramadan (1999) "Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-Wind Energy Conversion Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14, 3, pp. 766-772.
- [18] D. Villanueva, A. Feijóo, J.L. Pazos (2013) "Multivariate Weibull Distribution for Wind Speed and Wind Power Behavior Assessment", *Resources*, 2, pp. 370-384.
- [19] R.G. Aguirre (2016) "Evaluando el uso de energías eólica – solar en la Zona Metropolitana de Guadalajara, México", Tesis Doctoral, CUValles, UdeG.
- [20] J.F. Lawless (2002) "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", Editorial Wiley-VCH, USA.
- [21] N.L. Johnson, S. Kotz, N. Balakrishnan (1994) "Continuous Univariate Distributions, Volume 1, 2nd Edition", John Wiley & Sons, Inc.
- [22] P. R. Cristian (1994) "The Bayesian Choice, A Decision Theoretic Motivation", Springer-Verlag.
- [23] A. O'Hagan, J. Forster (2004) "Kendall's Advanced Theory of Statistics, Vol 2B, Bayesian Inference", Arnold.
- [24] R.T. Pinker, B. Zhang, E.G. Dutton (2005) "Do satellites detect trends in surface solar radiation?", *Science* 308, pp. 850-854.
- [25] J. Ye, F. Li, G. Sun, A. Guo (2009) "Solar dimming and its impact on estimating solar radiation from diurnal temperature range in China, 1961-2007", *Theor. Appl. Climatology*, Springer-Verlag, 101, pp. 137-142.
- [26] R. Sánchez, S. Sánchez, R.J. Sánchez, J. Alcalá, G.R. Aguirre (2015) "Análisis espacial estimando regiones de riesgo por contaminantes que exceden con más frecuencia la norma en Guadalajara, México", *Revista Iberoamericana de Ciencias*, Vol. 2, No. 2, pp. 65-85