



**Congreso Nacional del Medio Ambiente**  
Cumbre del Desarrollo Sostenible

**COMUNICACIÓN TÉCNICA**

# Realización de mapas de irradiación solar en la Región de Murcia

Autor: José Pablo Delgado Marín

Institución: Agencia de Gestión de Energía de la Región de Murcia (ARGEM)  
E-mail: [jpablo.delgado@argem.es](mailto:jpablo.delgado@argem.es)

Otros autores: F. Vera-García, J.R. García-Cascales, Z. Hernández-Guillén:  
Universidad Politécnica de Cartagena



## **RESUMEN:**

En este artículo se presentan los mapas de irradiación solar sobre la superficie de la Región de Murcia. Estos mapas son el resultado del tratamiento, estudio y obtención de correlaciones a partir de los datos procedentes de 35 estaciones meteorológicas repartidas por la Región. Estas estaciones llevan recopilando datos desde entre 6 y 25 años la de más antigüedad. En el estudio se presentan los trabajos realizados para el tratamiento de los datos recopilados, las correlaciones utilizadas para el ajuste de los datos y los parámetros obtenidos como resultado de este ajuste. Las estaciones meteorológicas están provistas de diferentes sensores para la recolección de varios parámetros, las medidas tratadas y utilizadas para el estudio han sido las siguientes: irradiación global y difusa (en el caso de que la estación disponga de piranómetro de difusa) y; temperatura ambiente. Los resultados obtenidos han servido para la realización de mapas de irradiación (global y difusa) en plano horizontal, y de temperatura ambiente a nivel superficial de la región. Para la realización de los mapas de irradiación extendidos a toda la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, se ha utilizado el programa r.sun, programa que utiliza técnicas SIG (Sistemas de Información Geográfica, en inglés GIS) para evaluar la influencia de las variables geográficas sobre la irradiación captada sobre plano horizontal a nivel superficial. Mediante los resultados procedentes del programa a partir de datos teóricos y/o genéricos y, con la realimentación de las correlaciones obtenidas de medidas tratadas procedentes de las estaciones meteorológicas, se ha evaluado la irradiación incidente sobre la región. El resultado último ha sido la obtención de mapas de la irradiación media mensual y media anual sobre plano horizontal. En base a esto resultados se han confeccionado mapas y tablas de radiación solar mensual (media máxima y mínima) para cada uno de los 45 municipios de la Región de Murcia. De esta manera se ha obtenido en conjunto una herramienta de utilidad durante el cálculo de energía disponible y necesidades térmicas en el proceso de diseño de instalaciones de aprovechamiento solar, tanto térmico como fotovoltaico.



## INTRODUCCIÓN

La energía procedente del sol es la responsable de la gran mayoría de los tipos de energía que transforma y utiliza el hombre para su disfrute. Además esta fuente de energía es inagotable a escala humana, por lo tanto la energía solar ocupa un lugar preferente en el campo de las energías renovables.

Para hacer posible la captación y utilización de la energía solar es necesario realizar un buen diseño de la instalación de captación siguiendo una serie de criterios teóricos y técnicos, inclinación correcta al ecuador, diseño de sistemas de seguimiento solar, elección correcta de los materiales a utilizar por los captadores, etc. Un parámetro importante para la evaluación y realización de sistemas de captación es, sin ninguna duda, conocer con exactitud y fiabilidad la energía solar incidente en el lugar donde se pretende aprovechar. La Comunidad Económica Europea (CEE) lleva años hablando de la catalogación de zonas como susceptibles a la denominada “explotación solar” [1], esta catalogación se ha realizado en base al potencial energético disponible del sol para cada región.

En cuanto a la realización de atlas de irradiación solar, existen numerosas referencias al respecto, en donde se describe, la base teórica y formulaciones pertinentes. La referencia formal vigente en España ha sido el “Atlas de Radiación Solar de España” [2] realizado por el Instituto Nacional de Meteorología (INM). Además es posible encontrar mapas actualizados de irradiación solar en los “Informes de coyuntura” del Ministerio de Medio Ambiente, publicados en su Web y avalados por el INM. Por otro lado, han sido varias las Comunidades Autónomas Españolas que han realizado su propio mapa solar y/o climático. En el estudio bibliográfico se muestran algunos ejemplos de mapas de radiación por comunidades, referencias [3-4]. En lo que respecta a la región de Murcia, tiene un potencial inmenso en el campo de las energías renovables, y especialmente de energía solar. Así lo demuestra el creciente interés de las empresas por instalar sistemas de captación solar (térmica y fotovoltaica) en numerosos municipios de la Región de Murcia. Todo lo comentado justifica la realización de un atlas detallado de irradiación solar para la región.

En el desarrollo del trabajo se desarrollarán técnicas de búsqueda, tratamiento e interpretación de los datos disponibles de irradiación solar y temperatura ambiente de las diferentes estaciones meteorológicas instaladas en la Comunidad Región de Murcia.

Este trabajo también lleva incluido una serie de mapas de temperaturas medias del aire, siempre con la perspectiva de ser útiles para el prediseño de instalaciones de aprovechamiento solar, mediante la captación térmica y/o fotovoltaica o mediante la utilización de arquitectura bioclimática.



## **OBJETIVO DEL TRABAJO**

El aprovechamiento de la energía solar está condicionado principalmente por dos aspectos: de la intensidad de la irradiación solar recibida por la Tierra, la que su vez depende de los ciclos diarios y anuales y de la latitud del lugar de aplicación sobre la superficie terrestre, y de las condiciones climatológicas y meteorológicas imperantes.

Tal y como pone de manifiesto las noticias y actuaciones, el apoyo tanto social como gubernamental al uso de fuentes de energía renovable es creciente. Por lo tanto, para el aprovechamiento de la irradiación solar como fuente de energía requiere del conocimiento de la cantidad y distribución de la irradiación solar que incide en un lugar determinado y de su variación temporal a lo largo de los ciclos anual y diario.

La irradiación solar que incide sobre una región determinada se suele representar en mapas mensuales y anuales de irradiación solar. El procedimiento más comúnmente usado para la confección de estos mapas es mediante la interpolación-extrapolación de series temporales de medidas de irradiación solar en superficie, realizadas mediante piranómetros en puntos geográficos específicos.

Mediante la utilización de estos mapas se evalúa la viabilidad (o no viabilidad) de instalaciones particulares de captación de energía solar (térmica o fotovoltaica). Incluso se llega al nivel de catalogar zonas como susceptibles (o no) a la denominada “explotación solar”.

El objetivo de este trabajo es la elaboración de un mapa de irradiación solar media recibida sobre plano horizontal y de temperaturas medias del aire a nivel de la superficie, específico para la Región de Murcia.

## **OBTENCIÓN DE LOS DATOS.**

Si se desea valorar ahora la evolución de los datos de irradiación solar terrestre para realizar algún análisis climático o si se desean realizar previsiones sobre la irradiancia o irradiación en un lugar determinado y sobre una superficie de captación inclinada u horizontal, se tienen tres opciones:

1. Recurrir a bases de datos de irradiación solar en dicho lugar y realizar previsiones basadas en la experiencia anterior del lugar en cuestión. Dichas previsiones serán más fiables cuando la base de datos sea temporalmente más extensa. Esta posibilidad se hace inviable debido a que sería necesario la instalación de estaciones de medida, a priori, en todos aquellos lugares susceptibles de ser objeto de proyectos de aprovechamiento solar.
2. Recurrir a modelos matemáticos, más o menos complejos del comportamiento de la atmósfera terrestre que permitan realizar correlaciones entre datos terrestres y datos conocidos de irradiación extraterrestre.



3. Recurrir a modelos matemáticos-estadísticos de interpolación y extrapolación, que con la ayuda de: datos de irradiación terrestre en lugares cercanos combinados con otros datos (geográficos, climatológicos, turbidez, etc.), y; datos conocidos y/o calculados de irradiación extraterrestre; y aplicando los modelos puedan ser estimados los valores de irradiación horizontal en un lugar concreto.

La primera opción se hace totalmente inviable debido a la cantidad de estaciones de medida necesarias y al tiempo que llevaría la realización de una base de datos fiable. Los modelos matemáticos de los que se habla en el punto 2, requieren de un estudio más extenso que excede los objetivos de este texto, ya que requiere modelar un gran número de variables climatológicas.

Los modelos matemáticos/estadísticos de los que se habla en el punto 3, van a ser utilizados en este estudio para la realización de los mapas solares. Estos modelos no están exentos de la utilización de datos medidos y, por supuesto, cuanto mayor la base de datos utilizada más fiable será la respuesta del modelo utilizado.

### ***Estaciones y puntos de medida***

Hoy en día existe disponibilidad de datos de irradiación solar terrestre provenientes de estaciones de medición agrupadas en redes más o menos organizadas. En concreto el “Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y alimentario” (IMIDA) dispone de más de 100 estaciones de medida repartidas en a lo largo y ancho de la Comunidad Autónoma de Murcia, más de 30 de estas estaciones disponen de algún sistema de medida de irradiación solar. Algunas de estas estaciones están recopilando datos desde hace más de 10 años. Estos datos y los datos procedentes de la Estación Meteorológica de Guadalupe, perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología (INM) con datos de irradiación desde hace casi 25 años, han sido los datos utilizados para el estudio.

La figura 1 muestra la disposición espacial de las estaciones en el mapa de la Comunidad de la Región de Murcia. Y en la tabla 1 se muestra una relación de los códigos de las estaciones con la población, la posición exacta de su situación (coordenadas UTM y su altitud sobre el nivel del mar) y nombres de los aparatos de medida utilizados en cada estación. Información más detallada de las estaciones se puede encontrar en la dirección web del IMIDA <http://siam.imida.es/siam.htm> .

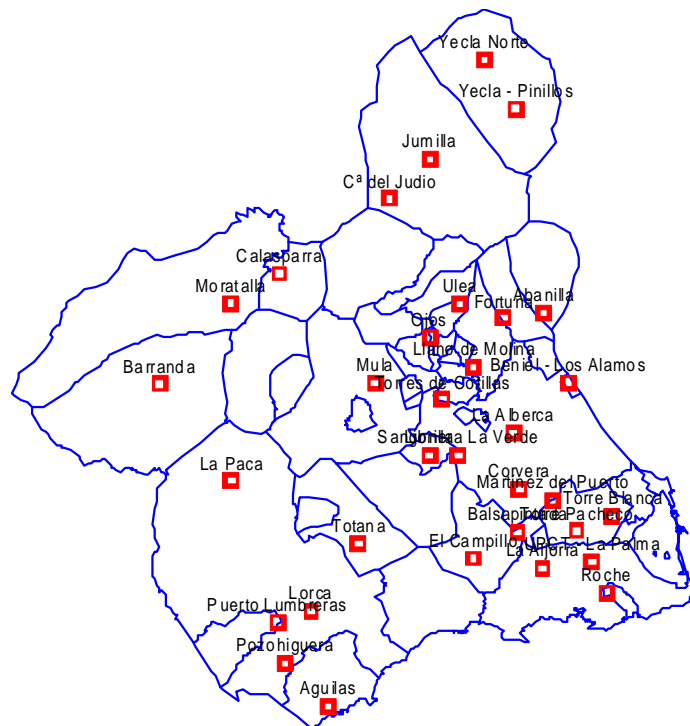


Figura 1. Disposición de las estaciones de medida en el territorio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Codigo	Nombre	X_UTM50 00	Y_UTM50 00	LONG (W)	LAT (N)	Cota	Sensor RAD
AL31	Totana	631134	4177380	1° 30' 47.29"	37° 43' 56.99"	234	SP1110
AL51	Librilla	646202	4196165	1° 20' 18.01"	37° 53' 57.91"	164	SP1110
CA12	UPCT - La Palma	680785	4173450	0° 57' 03.09"	37° 41' 19.92"	30	SP1110
CA21	Corvera	665320	4188975	1° 07' 22.49"	37° 49' 53.04"	225	SP1110
CA42	Balsapintada	664924	4179770	1° 07' 45.14"	37° 44' 53.89"	136	SP1110
CA52	La Aljorra	670233	4171939	1° 04' 14.18"	37° 40' 37.25"	84	SP1110
CA72	Roche	683796	4166811	0° 55' 08.73"	37° 37' 41.35"	63	SP1110
CA91	El Campillo	655462	4174084	1° 14' 16.96"	37° 41' 56.52"	174	CMP6
...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 1. Estaciones de medida de irradiación solar consideradas en el presente estudio. Fuente: IMIDA y INM-Región de Murcia



### ***Filtrado y depuración de los datos medidos***

Todos los datos recopilados se han sometido a un proceso de depuración para controlar la calidad de las medidas obtenidas. Todas las medidas de campo están expuestas a múltiples fuentes de error, desde la propia toma de la medida hasta llegar a ser incluida en la base de datos. Estas fuentes son difíciles de detectar, pero en cambio los errores de medida deben ser eliminados para poder utilizar estos datos con fiabilidad suficiente a la hora de hacer los estudios.

En este trabajo se ha utilizado un método parecido al desarrollado por Baldasano en la realización del “Atlas de radiación solar a Catalunya” del año 2001 para detectar y desestimar los datos con alta probabilidad de error. Este método consiste en el análisis de registros en función de dos criterios; coherencia temporal y espacial. Estos dos criterios son complementarios y se han realizado intercalados en el proceso de depuración de los datos.

En primer lugar se representan gráficamente las series de datos disponibles para cada estación y para todos los años que se tenga registro. Un ejemplo de estos gráficos se puede observar en la figura 2. Una vez se han representado se observa valores anómalos en la curva de irradiación que se separan en exceso. Estos valores son eliminados directamente de la serie de datos. En la figura 2 se muestran marcados en círculos los algunos de los datos desestimados de las series.

En segundo lugar se comparan los datos con la curva anual de irradiación máxima a nivel del mar, y todos los datos que la sobrepasen se desestiman.

La selección espacial se realiza de la siguiente forma. Si dos estaciones cercanas ofrecen datos muy diferentes se comparan los datos con una tercera estación cercana a ambas y se desestiman (o ajustan) los datos procedentes de la estación con datos más dispares.

Cada estación meteorológica lleva funcionando un número de meses diferentes y alguna de las estaciones lleva funcionando menos de 2 años. La simultaneidad de los datos, el número de datos disponibles por cada estación, la cercanía de las estaciones, el mantenimiento de los aparatos de medida, etc. son factores importantes para tener un nivel aceptable en la fiabilidad de los datos y de los resultados.

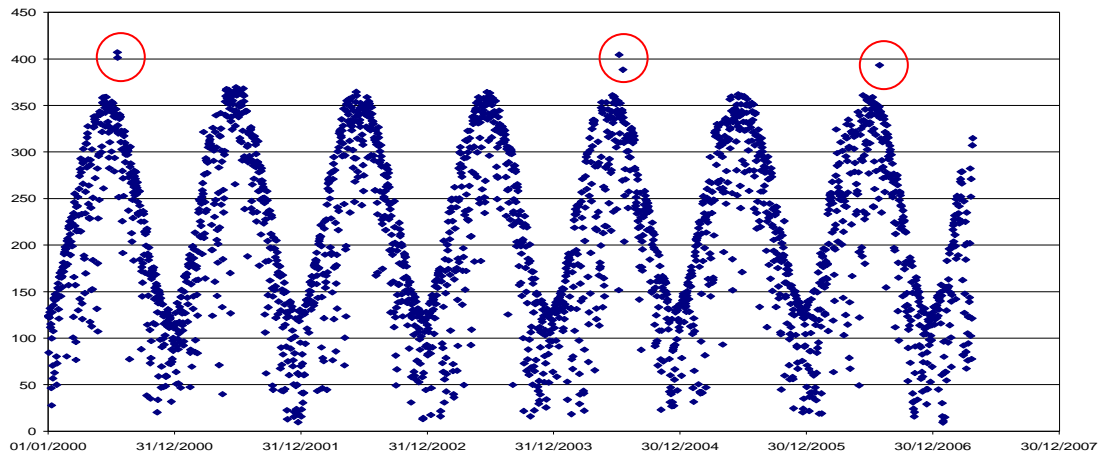


Figura 2. Representación gráfica de los datos de irradiación procedentes de la estación de medida de Lorca. Marcados en círculo rojos se encuentran los datos desestimados en el proceso de depuración.

### **Recopilación y búsqueda de otros datos necesarios**

Para el cálculo de instalaciones de aprovechamiento solar es necesario conocer la temperatura ambiente media del lugar si se quiere realizar un buen dimensionamiento y/o protección de los captadores solares (colectores o placas FV). Esta variable se ha recopilado de las mismas instituciones propietarias de las estaciones de medida de irradiación solar, IMIDA e INM. Las propiedades y características de los sensores de temperatura utilizados se puede encontrar en la web del IMIDA (<http://siam.imida.es/siam.htm>).

Por otro lado para realizar un tratamiento correcto de los datos y correlacionar estos con los resultados de los modelos de irradiación ampliamente utilizados es necesaria la cuantificación de parámetros como los que siguen:

- Factor de Linke. Este factor cuantifica la turbidez del aire. Este factor es importante para cuantificar y modelar correctamente fenómenos, como la absorción y la dispersión de la irradiación solar que sufre la irradiación solar al traspasar la atmósfera terrestre. Este factor esta cuantificado mes a mes por el SoDa “Services for Professionals in Solar Energy and Radiation” y puede obtenerse en función de las coordenadas del lugar de la dirección <http://www.helioclim.net>.
- Frecuencia de cielos soleados. Otro dato importante para tratar los datos de irradiación de manera correcta es la frecuencia de días soleados. Este datos se puede encontrar en las bases de datos procedentes de servidores de satélites. Se encuentra es porcentaje de probabilidad para cada mes en función de la latitud y longitud del lugar. Se ha realizado una interpolación cuadrática para obtener un valor medio válido en la región de Murcia. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos del servidor web
- Horas de sol diarias. Este dato es más interesante que el anterior ya que nos proporciona más información y de una manera más directa. Para que estos datos



puedan ser de utilidad tienen que ser recogidos directamente de las estaciones meteorológicas. En el proceso de obtención de los datos, se ha detectado que solamente la estación meteorológica del INM recoge las horas de sol, por lo tanto este dato no ha sido utilizado para realización de los mapas pero si se utilizará en un proceso posterior de validación de los resultados obtenidos.

Month	Frequency of Sunny Skies (%)
January	58.8
February	75.3
March	70.5
April	67.8
May	66.0
June	81.7
July	89.7
August	84.5
September	70.6
October	70.6
November	67.1
December	61.3
Year	72.9

Tabla 2 Frecuencia de cielo despejado para la región de Murcia. La información cubre desde la salida hasta la puesta de Sol y se ha calculado de información recogida desde el año 1996 hasta 2000. Fuente: "Satel-light Enterprise" y SoDa.

Por otro lado, se han utilizado otros datos necesarios para el cálculo y tratamiento correcto de datos de la irradiación mediante el uso de técnicas SIG, como p.e. datos geográficos, orientaciones y elevaciones del terreno, Figura 3 y Figura 4, o factor de Linke o factor de turbidez en el ambiente, web de SoDa "Services for Professionals in Solar Energy and Radiation". Estos y otros datos importantes se han obtenido de diferentes fuentes disponibles en Internet o publicaciones de otros atlas solares más genéricos.

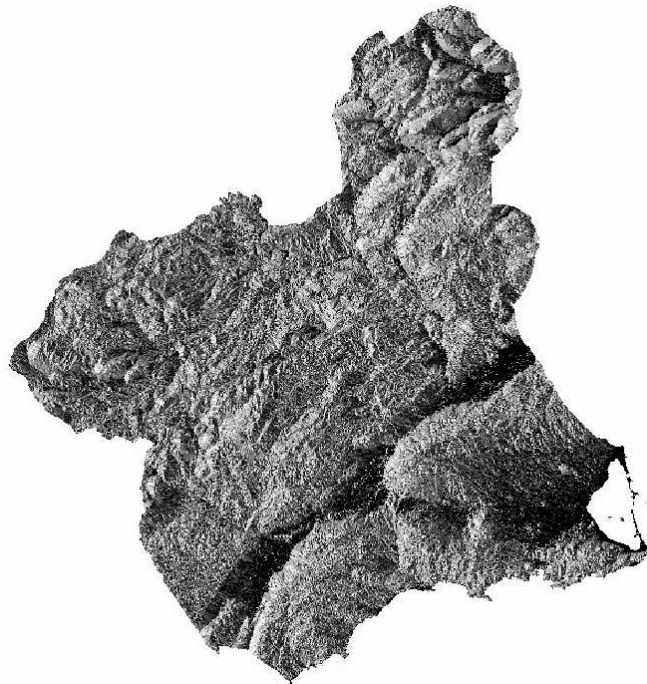


Figura 3 Orientaciones del terreno

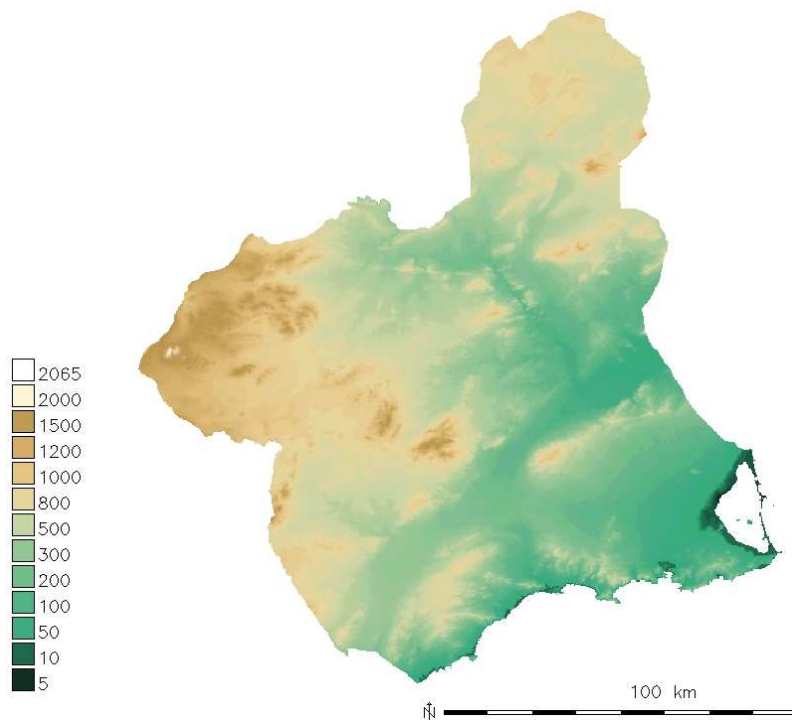


Figura 4. Elevaciones del terreno.



## TRATAMIENTO DE LOS DATOS

El tratamiento de los datos y su utilización es una de las partes más relevantes del trabajo realizado. Un tratamiento de los datos correcto lleva asociado: una puesta en común de datos procedentes de diferentes fuentes, una depuración de estos, una adecuación de los datos para su uso en modelos y en sistemas de representación SIG; etc.

### ***Factores a tener en cuenta en el tratamiento de los datos***

La irradiación solar medida en un lugar depende principalmente de los siguientes factores:

- Factores astronómicos: la declinación y la distancia del sol a la tierra varían a lo largo del año. Estos factores son fáciles de cuantificar aplicando las ecuaciones que describen el movimiento de traslación de la tierra respecto al sol, la ecuación de irradiación es función de la constante solar,  $1367 \text{ W/m}^2$  (el valor aceptado por el "World Radiation Center" (WRC)) y de la posición relativa del lugar de medida respecto al sol (o lo que es lo mismo, la declinación del Sol y la distancia de la Tierra al Sol, ambos son función del día del año).
- Factores geográficos: Estos factores son sobre todo la latitud y la longitud del lugar, no se puede olvidar la orografía del terreno y la altitud del lugar de medida ya que puede provocar sombras y reflejos que influyen a las medidas y, por lo tanto, a la irradiación disponible del lugar.
- Factores meteorológicos: Definidos principalmente por el estado del cielo. Por supuesto el estado del cielo es uno de los factores que más influye sobre el nivel de irradiación y el tipo disponible a nivel del suelo de ésta. El cielo despejado, por regla general, proporciona mayor proporción de irradiación directa que difusa, en cambio, con el cielo cubierto de nubes la ausencia de sombras nos hace indicar que la mayor parte de la irradiación recibida es del tipo difusa.

Los factores geográficos son constantes en el caso de no variar el posicionamiento de la estación de medida y que la orografía del terreno colindante no sea alterada de manera sensible. Los valores astronómicos son cíclicos a lo largo del año y están suficientemente caracterizados por las ecuaciones que definen el movimiento relativo del sol respecto a la tierra. En cambio, los factores de carácter meteorológico deben ser tratados mediante técnicas estadísticas debido a su carácter variable e impredecible.

### ***Modelo utilizado para el tratamiento de los datos***

La estrategia seguida para el tratamiento de los datos ha sido la misma que la utilizada por Baldasano et al. en [2001] para la creación del "Atlas de radiación solar a Catalunya". El tratamiento de los datos se ha realizado mediante la utilización de un modelo que se basa, en parte, en el estudio astronómico de la irradiación solar propuesto por Santabàrbara et al. [1996].

El tratamiento de los datos se puede dividir en tres fases. Una primera fase que consiste en la obtención de la irradiación diaria con cielo claro a nivel del mar teniendo en cuenta solamente los factores astronómicos; una segunda fase que consiste en la obtención de

la irradiación que contenga implícitamente los factores geográficos y meteorológicos mediante el ajuste de los parámetros mediante técnicas estadísticas; y, por último, obtención de la irradiación difusa mediante la aplicación del modelo de Liu-Jordan, modelo ampliamente contrastado y admitido por la comunidad científica especialista en el análisis de la irradiación solar. Estas tres fases de tratamiento de los datos se describen detalladamente en el siguiente apartado.

**Obtención de la irradiación global directa y difusa**

En primer lugar se ha obtenido la irradiación diaria con cielo claro a nivel del mar teniendo en cuenta solamente los factores astronómicos; “irradiación diaria solar global a nivel del mar, en caso de cielo siempre claro”.

Se ha calculado la irradiación extraterrestre diaria media mensual sobre plano horizontal, Ec. (1), para después aplicar calcular la dependencia temporal de la irradiación a nivel del mar mediante un modelo simplificado para latitudes cercanas a la región de Murcia, Ec. (2), y se compara el resultado con la evolución temporal obtenida para todos los años de recopilación de datos en cada una de las estaciones.

Irradiación extraterrestre diaria media mensual:

$$\bar{H}_e = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_0 E_0 \left[ \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_1 + \frac{\pi \omega_1}{180} \sin \varphi \sin \delta \right] \tag{1}$$

Irradiación a nivel del mar para latitudes de la Región de Murcia (Modelo Simplificado)

$$H_g = H_{e0} + A_g \times \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{365.25} \right) \times D + B_g \right] \tag{2}$$

Es importante remarcar que la Ecs. (1) y (2) no tiene en cuenta ninguno de los valores medidos, por lo tanto no tiene en cuenta factores del tipo geográfico y/o meteorológico, solamente tiene en cuenta los factores astronómicos.

La curva generada por esta expresión es de bastante utilidad para desechar los valores incorrectos en la medida de la irradiación en cada una de las estaciones (anteriormente explicado en el apartado Filtrado y depuración de los datos). La figura 5 muestra la comparación entre los resultados medidos en la estación de la UPCT en el campus de La Palma con la evolución de la irradiación mediante el uso de la ecuación 1.

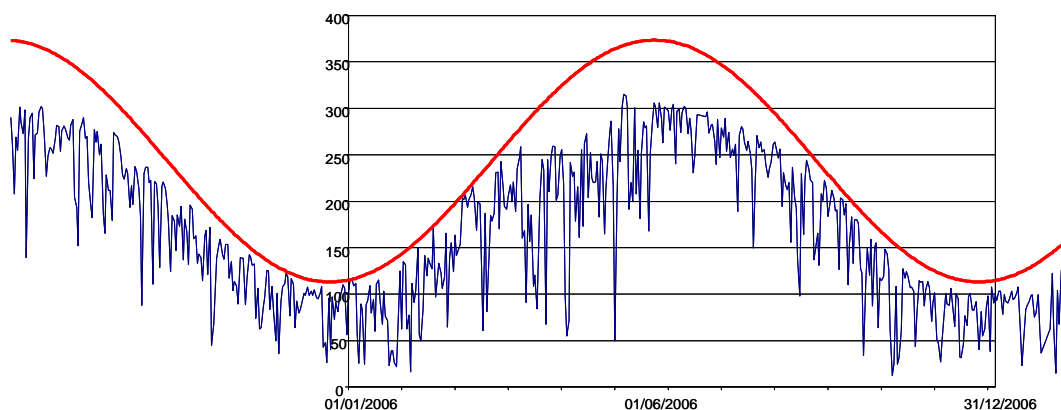




Figura 5. Comparación irradiación diaria solar global a nivel del mar, en caso de cielo siempre claro con la irradiación medida.

Esta ecuación es válida para realizar un filtrado de las medidas que se sobrepasen la curva por encima de la misma.

### **Obtención de la irradiación solar global para cada estación de medida**

El paso siguiente es considerar una expresión del mismo tipo pero obtenida partiendo de los datos medidos en cada una de las estaciones de medida.. Así, la curva obtenida tendrá incluida de manera implícita los factores geográficos y meteorológicos del lugar sujeto a estudio (estación meteorológica en particular). La expresión propuesta por el modelo es la siguiente:

$$\bar{H} = M + A \times \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{365.25} \right) \times D + B \right] \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

H = Irradiación global diaria media sobre plano horizontal

D = Día Juliano

M = Media anual de la irradiación diaria para el lugar estudiado

A= Amplitud de la variación anual de la irradiación diaria para el lugar

B= Factor que corrige el desfase provocado por iniciar el cálculo el día 1 de enero para el lugar sujeto a estudio

Los parámetros M, A y B son exclusivos para cada estación de recogida de datos y se obtienen del ajuste estadístico mediante la técnica de mínimos cuadrados utilizando la base de datos procedente de cada una de las estaciones meteorológicas.

Una vez se han ajustado los datos de todas las estaciones, se obtiene una base de datos con los parámetros M, A y B para todas los puntos de medida y mediante técnicas de interpolación espacial se obtienen mapas de irradiación global en toda la superficie de la región de Murcia, ejemplos de estos mapas se encuentran representados en el apartado de resultados de este trabajo.

### **Obtención de la irradiación solar difusa y directa para cada estación.**

La irradiación difusa es aquella que no proviene directamente del disco solar (irradiación solar que ha sufrido procesos de dispersión por los componentes de la atmósfera y proviene de todos los puntos de la bóveda celeste), este tipo de irradiación es importante sobre todo a la hora de calcular la irradiación incidente sobre superficies inclinadas. La medida de irradiación difusa se realiza con el mismo tipo de aparato que la irradiación global, el piranómetro en dirección a la bóveda celeste, pero manteniendo este bajo una banda de sombra que cubre el movimiento del disco solar para cada día de medida.

Una vez se obtiene la irradiación global y la irradiación difusa, la forma de obtener la irradiación directa es mediante la resta aritmética de ambas ( $H_b = H - H_d$ ), ya que la irradiación recibida por un piranómetro sin banda de sombra será la suma de la irradiación directa en plano horizontal más la irradiación difusa de toda la bóveda celeste.



Los datos de irradiación difusa pueden tener los mismos problemas que la irradiación global, ya que se mide con el mismo tipo de aparato. Además no todas las estaciones de medida disponen de piranómetro para la medida de irradiación difusa, en nuestro caso solamente 15% de las estaciones meteorológicas registran la irradiación difusa. Este hecho conlleva que el análisis y tratamiento de los datos debe de ser mucho más cuidadoso.

Para el tratamiento de los datos se ha utilizado el modelo desarrollado por Liu-Jordan en 1960. Este modelo está altamente contrastado y validado por diferentes autores desde su publicación. El modelo utiliza conjuntamente valores medidos de irradiación global y difusa y los relaciona con la irradiación extraterrestre obtenida a través del análisis astronómico. El modelo propone la expresión de la ecuación 4:

$$\frac{H_{D_0}}{H_0} = J_1 - J_2 \frac{H_{D_0}}{H_{\infty}} + J_3 \frac{\alpha H_{D_0}}{H_{\infty}} \frac{\delta^2}{\delta} - J_4 \frac{\alpha H_{D_0}}{H_{\infty}} \frac{\delta^3}{\delta} \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

$H_{D_0}$  = Irradiación difusa medida en cada estación sujeta a estudio.

$H_0$  = Irradiación global medida en cada estación sujeta a estudio.

$H_{\infty}$  = Irradiación solar extraterrestre

$J_1, J_2, J_3$  y  $J_4$  = Parámetros de ajuste de la ecuación dependientes de cada estación de medida

Con los datos procedentes de las estaciones que se obtiene medida de difusa y gracias a la utilización de la expresión de la ecuación 4, se ha hecho una extrapolación de las medidas para poder realizar mapas con un nivel mayor de detalle.

Un ejemplo de aplicación de las expresiones Ec. 3 y 4 es poder calcular la media mensual y/o diaria de la irradiación solar para cada estación. Esto se hace de forma tan simple como dando el valor D que corresponde a todos los días de cada mes y calcular la media de las radiaciones obtenidas.

Las correlaciones obtenidas para cada estación, tanto para el calculo de la radiación global como para la difusa, tienen un coeficiente de regresión alto, tal y como se regresión elevado. La Figuras 6 muestra la comparativa entre irradiación global medida para 5 años y la calculada por la expresión 3 y en la Figura 7 se muestra la evolución de la irradiación global y difusa a lo largo del año junto con las medidas obtenidas en esa estación. Se observa que la evolución esta dentro de un grado de confianza elevado.

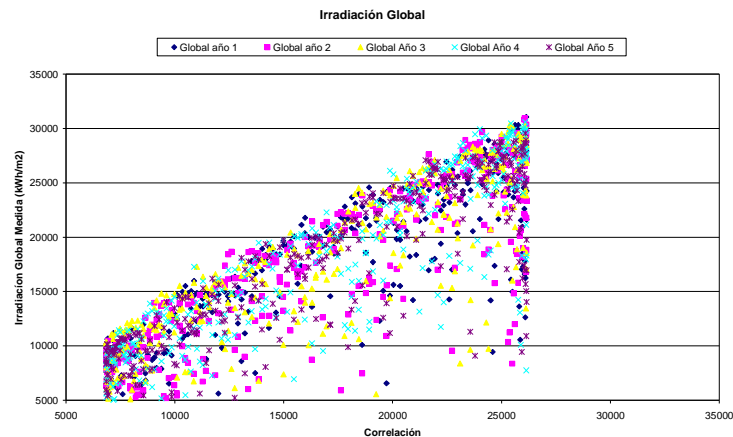


Figura 6. Comparativa irradiación medida vs. irradiación obtenida de la correlación Ec. (3)

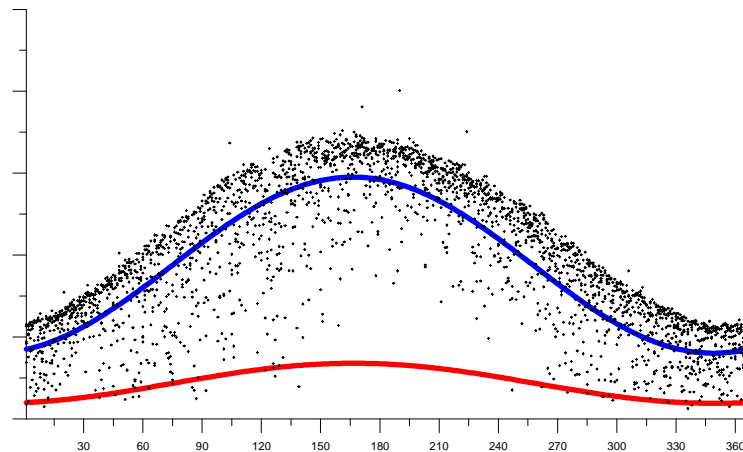


Figura 7. Comparación entre la irradiación global medida en una estación y de irradiación global y difusa obtenida mediante las Ecs. (3) y (4)

Código	Emplazamiento	Parámetros de Irradiación global			Parámetros de Irradiación Difusa			
		M	A	B	J1	J2	J3	J4
AL31	Sotana	17.3512287	9.6804611	3.417603	0.3272163	1.4254461	-4.4755865	3.6089248
AL51	Librilla	16.8568788	9.8303524	3.4220721	0.3648796	0.4254933	-2.6507905	2.7289913
CA12	UPCT - La Palma	14.5386156	8.4319868	3.3259052	0.3272163	1.4254461	-4.4755865	3.6089248
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 3. Parámetros de ajuste de obtenidos para la irradiación directa y difusa para cada una de las estaciones de medida. Parámetros de las ecuaciones 3.3 y 3.4.

La tabla 3 muestra como ejemplo los parámetros de ajuste de tres de las estaciones meteorológicas. Por supuesto, estos parámetros se han calculado por el resto de estaciones meteorológicas. Estas ecuaciones han sido las empleadas para realizar la interpolación espacial con técnicas GIS y, así obtener la irradiación (global, directa y difusa) de toda la región de Murcia.





### **Obtención de la temperatura media diaria**

Para el cálculo de la temperatura media diaria a nivel superficial se dispone de una serie temporal de datos a lo largo de varios años de muestreo en cada una de las estaciones meteorológicas anteriormente mencionadas. Con esta serie temporal se ha realizado un ajuste estadístico del mismo estilo al utilizado para la obtención de la irradiación global.

Para la obtención de la función estadística más apropiada para la modelización de la temperatura se han seguido los siguientes pasos. En primer lugar se ha calculado la temperatura media de cada día y de cada estación de medida, con estas medias se ha calculado la media a lo largo de los años de los que se dispone medidas. Utilizando estos valores como valores objetivo, y con todas series temporales medidas se ha realizado un análisis estadístico del tipo ANOVA (Análisis de la Varianza) mediante las librerías de cálculo IMSL, librerías implementadas en el programa Developer Studio ©. Mediante el Developer Studio © se ha programado, en el lenguaje de programación Visual Fortran, una aplicación capaz de obtener los parámetros de la función más apropiada para la temperatura media diaria.

Según el análisis ANOVA y sobre todo la bibliografía consultada, la función más apropiada para la temperatura media diaria debe tener como mínimo; un término medio fijo debido al área cálida para la cual se realiza el cálculo, latitudes cercanas a los 40°; por otro lado debe tener un término dependiente del día año, del mismo modo que en el caso de la irradiación global, este término será del tipo senoidal; y, por último, un término de ajuste sobre la desviación posible a serie temporal.

Con todo lo dicho se obtiene que esta función tenga una forma similar a la utilizada para el cálculo de la irradiación global media diaria, por supuesto, con parámetros de ajuste diferentes:

$$\bar{T} = T_M + T_A \times \cos \left( \frac{2\pi}{365.25} \times D + T_B \right) \quad \text{Ec.5}$$

Siendo:

$\bar{T}$  = Temperatura diaria media a nivel de la superficie

D = Día Juliano

$T_M$  = Media anual de la temperatura diaria para el lugar estudiado

$T_A$  = Amplitud de la variación anual de la Temperatura diaria para el lugar

$T_B$  = Factor que corrige el desfase provocado por iniciar el cálculo el día 1 de enero para el lugar sujeto a estudio

De la misma forma que la radiación, los parámetros obtenidos del ajuste de la ecuación 5 son válidos exclusivamente para cada una de las estaciones de medida. Una forma de comprobar la consistencia de la correlación elegida es mediante la comparación de los parámetros obtenidos para cada estación con los parámetros medios, se ha observado



que existe un nivel de varianza bajo, lo que nos lleva a la conclusión de lo consistente de la correlación.

Con la ecuación 5 particularizada para cada estación de medida y con las técnicas de interpolación espacial de GIS, ha sido posible el cálculo de la temperatura media a nivel superficial de todo el territorio que abarca la Región de Murcia.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### *Mapas de irradiación solar para la Región de Murcia*

A través de los datos previos de los coeficientes de radiación directa y difusa con cielo totalmente claro en cada una de las 35 estaciones para cada día del año, (y por otro lado temperatura a nivel superficial), se obtuvieron las capas ráster para todo el área de estudio mediante interpolación de los datos también para cada día del año. Se rasterizó la información por medio del inverso de la distancia, método que estima el valor de cada una de las celdillas como la media ponderada de los valores medidos en un conjunto de puntos de muestreo situados alrededor, obteniendo así dos capas ráster con los coeficientes de radiación difusa y radiación directa para cada día del año.

Como resultado de obtuvieron 12 mapas mensuales de radiación global media mensual, se muestran como ejemplo los meses de Enero y Julio en las figuras 8 y 9 respectivamente. Un mapa de radiación global media anual en la figura 10.

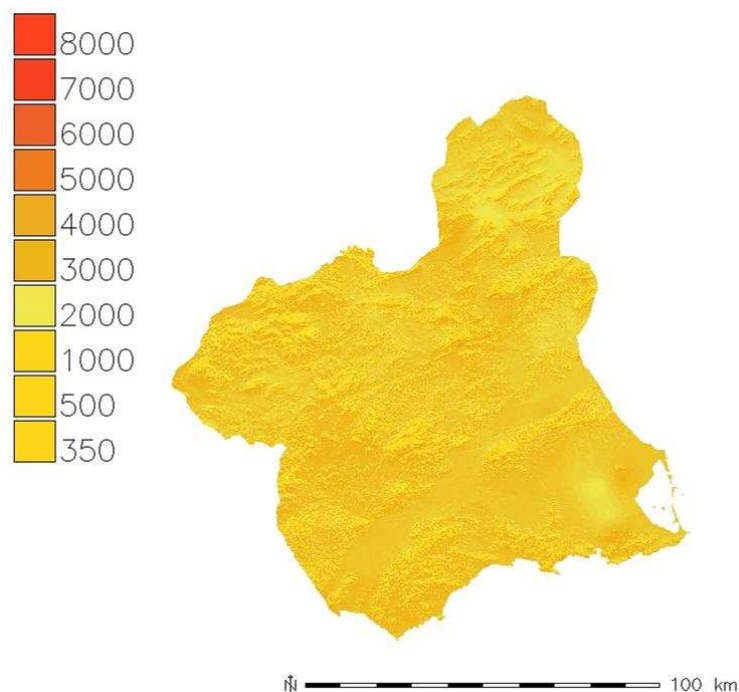


Figura 8. Mapa de radiación global diaria, media del mes de enero.

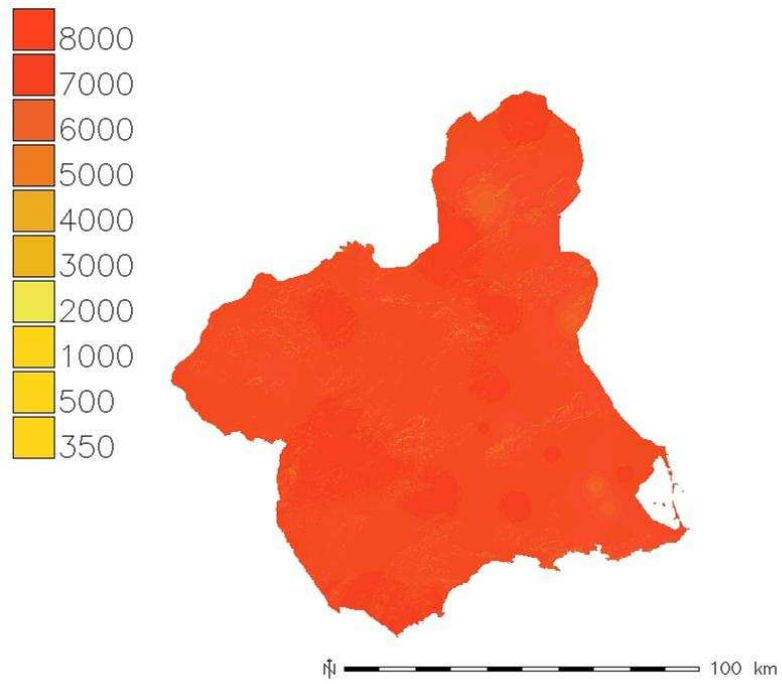


Figura 9. Mapa de radiación global diaria, media del mes de julio.

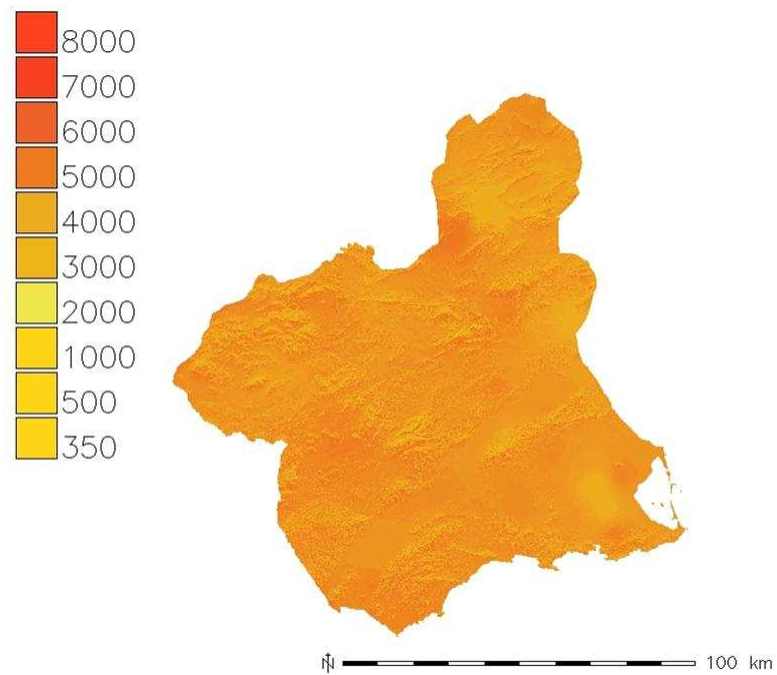


Figura 10. Mapa de irradiación global diaria, media anual.

Cada mapa cubre la superficie total de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia con una resolución espacial de 250 x 250 metros. Las unidades en las que se presenta la radiación son Whm-2día-1.

Además, se muestra la irradiación media anual **directa** y **difusa** de la región de Murcia en las figuras 11 y 12 respectivamente. En total se obtuvieron 16 mapas de irradiación con la cual se obtiene una idea clara de los niveles de irradiación para todos los puntos geográficos de la Región de Murcia.

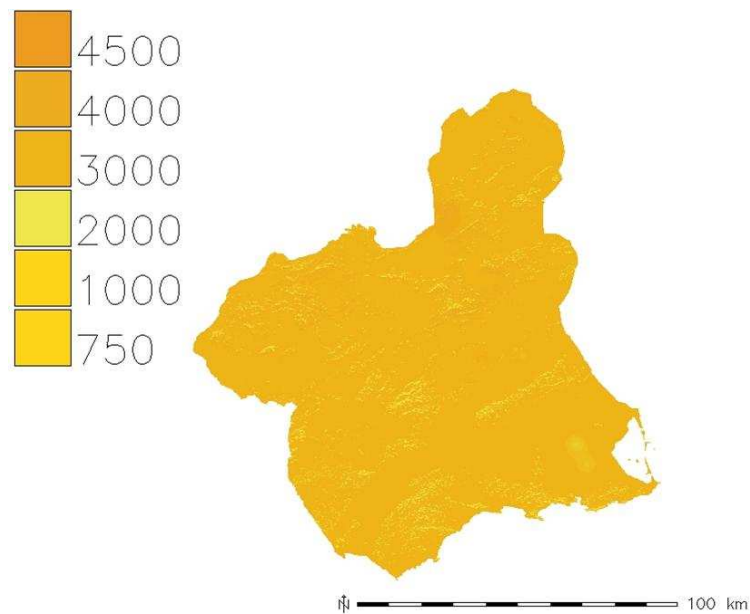


Figura 11. Mapa de irradiación directa diaria, media anual.

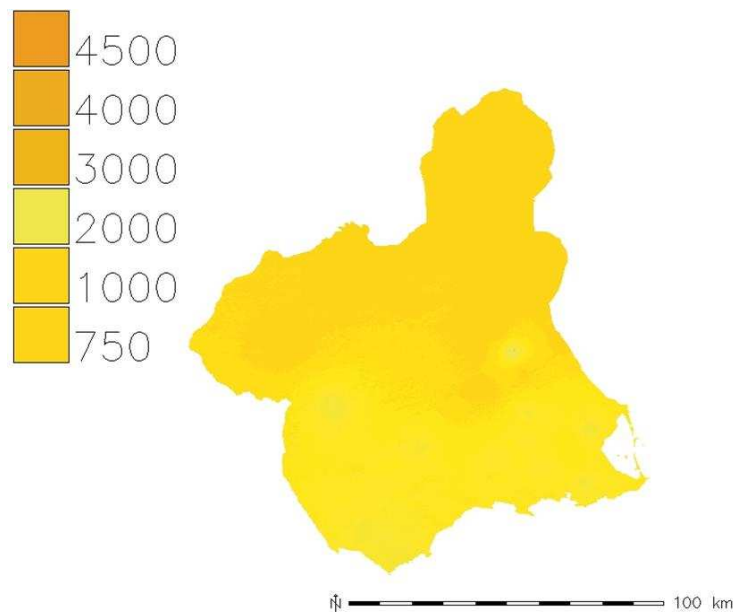


Figura 12. Mapa de radiación difusa diaria, media anual.

Con las técnicas GIS es posible pormenorizar los cálculos para extensiones de terreno más pequeñas. Por lo tanto se realizaron los mismos cálculos para cada uno de los 45 términos municipales que conforman la región. Estos mapas exponen la radiación global media anual extendida al término municipal particular de cada municipio. Se muestran tres de estos mapas a título de ejemplo en las figuras 13, 14 y 15.

Estos mapas son de especial ayuda a la hora de obtener datos de radiación en un sitio particular del término municipal, sobre todo para los términos municipales de gran superficie.

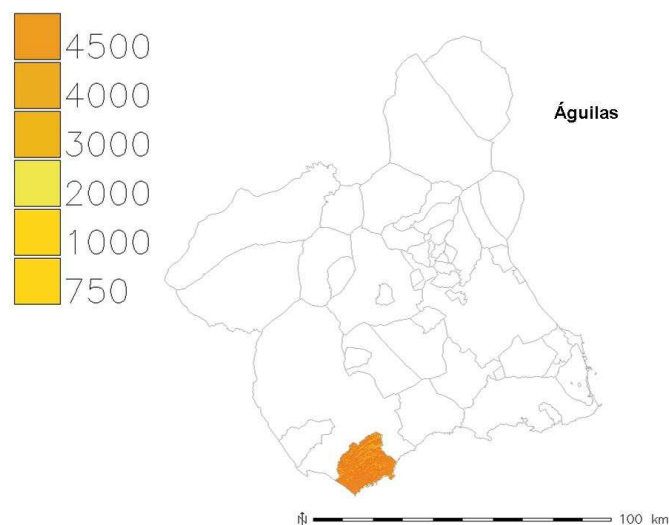


Figura 13. Mapa de radiación global de T.M. de Águilas.

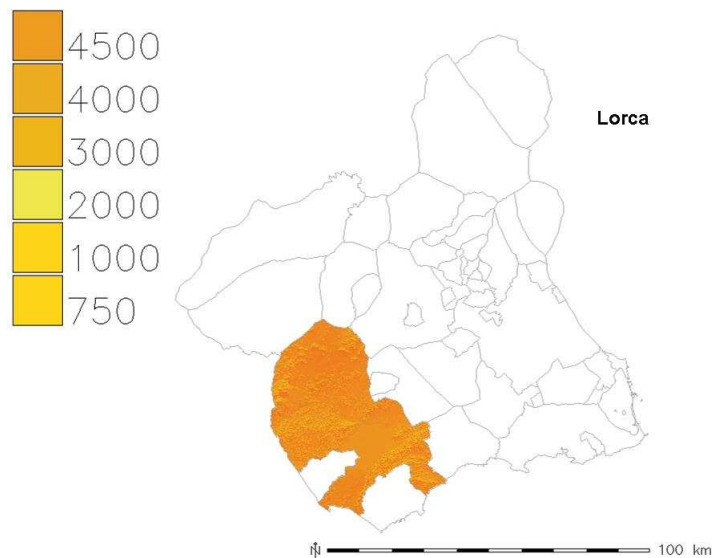


Figura 14. Mapa de radiación global de T.M. de Lorca.

A partir de los resultados es posible la confección de una tabla en la que aparecen los niveles de radiación media, máxima y mínima anual y mensual de cada uno de los municipios de la Región de Murcia. En la tabla 4 se muestra como ejemplo la radiación máxima, media y mínima de 5 de estos municipios para los 6 primeros meses del año. Esta tabla es útil cuando se desea obtener un valor medio, máximo y/o mínimo de un municipio en particular.

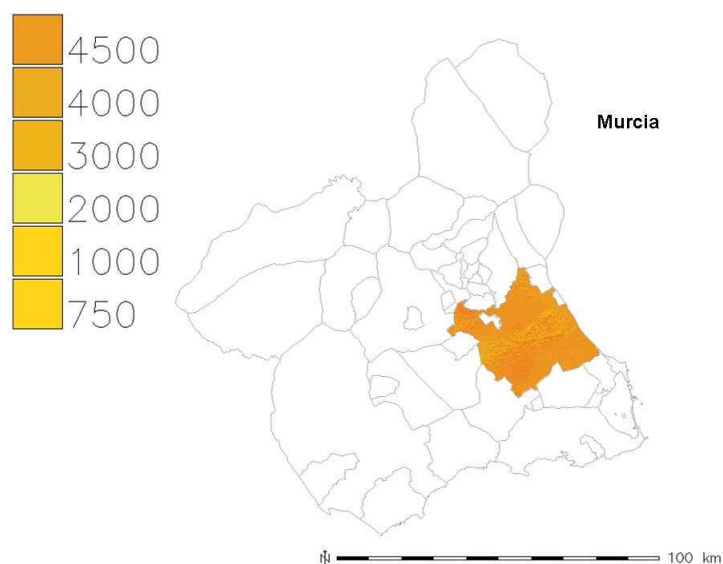


Figura 15. Mapa de radiación global de T.M. de Murcia.

	Wh/m <sup>2</sup> *día	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	ANUAL
Abanilla	MINIMA	448.541	704.547	1484.94	2747.63	4126.89	4634.99	2097.18
	<b>MEDIA</b>	<b>2303.12</b>	<b>3188.69</b>	<b>4385.16</b>	<b>5581.06</b>	<b>6472.5</b>	<b>6780.67</b>	<b>4349.07</b>
	MAXIMA	4680.52	5248.61	5665.48	6225.27	6846.07	7148.71	5193.49
Abarán	MINIMA	494.697	672.543	1435.38	3067.49	4375.44	4891.97	2329.26
	<b>MEDIA</b>	<b>2249.1</b>	<b>3173.79</b>	<b>4458.36</b>	<b>5756.51</b>	<b>6773.48</b>	<b>7138.75</b>	<b>4482.49</b>
	MAXIMA	4797.09	5456.8	5969.88	6456.57	7076.42	7403.32	5419.43
Águilas	MINIMA	716.452	1015.7	2127.27	3592.71	4868.75	5496.42	2681.64
	<b>MEDIA</b>	<b>2691.3</b>	<b>3611.77</b>	<b>4842.41</b>	<b>6063.13</b>	<b>6928.68</b>	<b>7246.96</b>	<b>4778.45</b>
	MAXIMA	4782.16	5428.94	5994.43	6585.7	7175.44	7524.93	5529.12
Albudeite	MINIMA	705.258	1427.91	2781.25	4490.28	5774.85	6373.59	3276.36
	<b>MEDIA</b>	<b>2412.82</b>	<b>3327.81</b>	<b>4577.45</b>	<b>5863.53</b>	<b>6854.3</b>	<b>7229.73</b>	<b>4638.48</b>
	MAXIMA	3628.81	4499.98	5494.53	6342.53	6990.38	7341.42	5288.54
Alcantarilla	MINIMA	1039.19	1858.69	3240.93	4901.81	6317.57	6944.36	3647.04
	<b>MEDIA</b>	<b>2426.14</b>	<b>3359.07</b>	<b>4617.58</b>	<b>5908.04</b>	<b>6867.16</b>	<b>7228.68</b>	<b>4634.39</b>
	MAXIMA	3284.5	4154.85	5237.16	6238.85	6959.26	7311.28	5118.03
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 4. Radiación Global media, máxima y mínima (Wh/m<sup>2</sup>\*día), mensual (meses de Enero a Junio) y anual para diferentes municipios de la Región.

### Tablas de irradiación en superficie inclinada

Para la obtención de la irradiación sobre superficie inclinada se ha utilizado los factores de corrección geométrica descritos en el libro “Radiación Solar sobre la superficie de la tierra. Fundamentos” de Javier Cañada (2000).

Conjugando las curvas y mapas obtenidos se han obtenido tablas de irradiación solar sobre superficie horizontal y sobre superficie inclinada para todos los municipios que forman la Región de Murcia. La Tabla 2 muestra un ejemplo de estas tablas para uno de estos municipios.

Radiación sobre plano inclinado para un municipio de la Región de Murcia													
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Inclinación superficie	0°	8604.3	12124.5	16855.6	21725.7	25279.6	26578.6	25249.5	21597.1	16711.8	11865.7	8355.8	7144.1
	10°	10865.6	14343.4	18583.8	22601.1	25311.6	26180.9	25058.5	22113.7	18014.2	13683.7	10345.0	9221.6
	20°	12856.0	16209.6	19864.0	22965.1	24840.1	25307.1	24389.8	22148.7	18886.9	15168.0	12078.4	11069.0
	30°	14515.1	17666.5	20657.3	22801.6	23860.8	23955.0	23240.8	21692.3	19302.6	16273.6	13503.4	12630.1
	40°	15792.3	18669.8	20939.6	22113.4	22395.2	22153.3	21636.0	20754.6	19248.5	16966.7	14576.8	13857.6
	50°	16649.1	19188.9	20702.2	20921.1	20486.2	19954.0	19622.2	19363.3	18726.1	17226.4	15265.8	14714.0
	60°	17059.2	19208.1	19952.4	19262.0	18196.1	17430.4	17265.8	17562.6	17751.5	17044.7	15549.5	15173.5
	70°	17010.2	18726.9	18713.0	17189.5	15606.2	14677.5	14653.1	15412.8	16354.7	16427.2	15419.4	15222.0
	80°	16503.7	17759.9	17021.9	14773.3	12820.6	11818.0	11895.0	12991.0	14578.9	15392.6	14879.4	14858.1
	90°	15554.9	16336.3	14930.4	12101.0	9979.7	9027.3	9145.8	10396.2	12479.7	13972.4	13945.8	14092.8

Tabla 5. Irradiación solar sobre plano inclinado para un municipio en particular.

### Mapas de temperatura para la Región de Murcia

De igual forma que los mapas de irradiación, se calcularon y representaron los mapas con la temperatura media a nivel superficial. Cada mapa cubre la superficie total de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia con una resolución espacial de 250 x 250 metros. Las unidades en las que se presentan estos mapas son °C.

En este trabajo se muestra a nivel de ejemplo la temperatura media diaria de los meses de enero y Julio, además de la media anual.

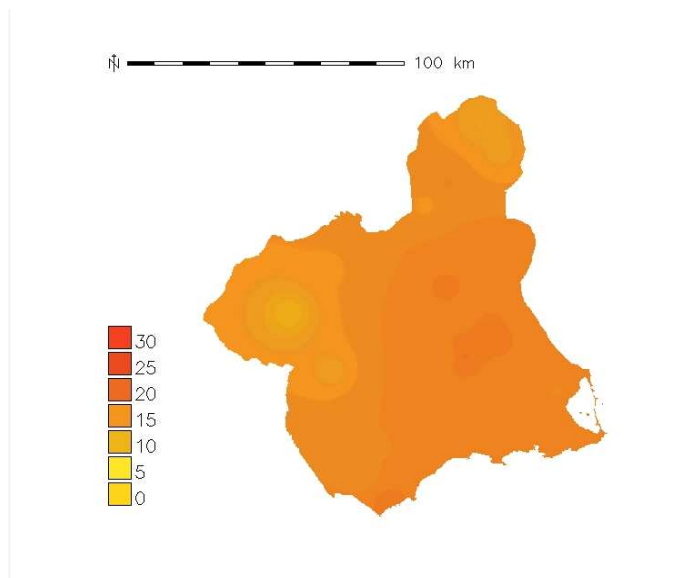


Figura 16. Mapa de temperatura media anual.

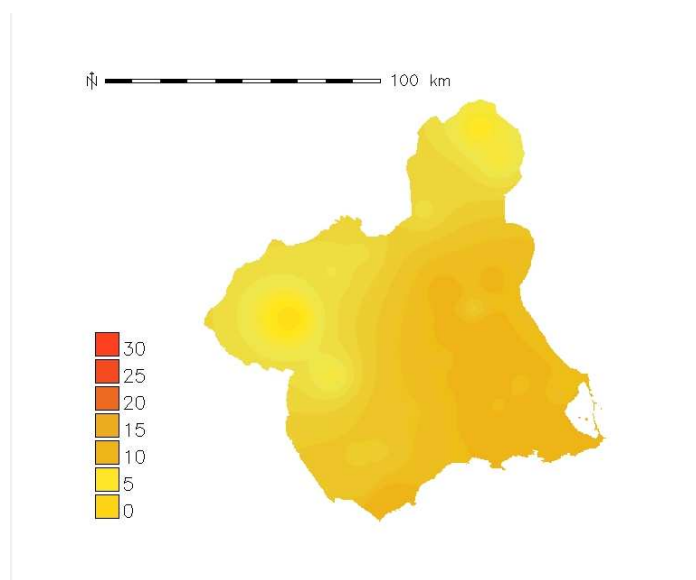


Figura 17. Mapa de temperatura media mes de enero.

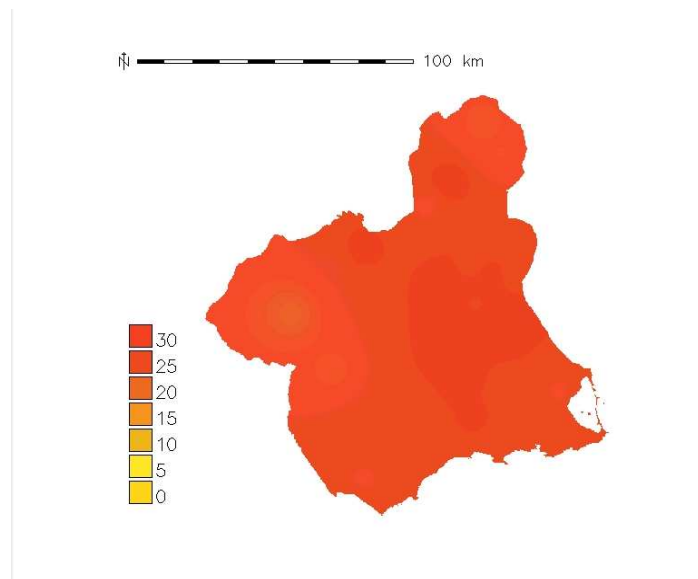


Figura 18. Mapa de temperatura media mes de julio.

## CONCLUSIONES

Con los resultados de este trabajo se ha obtenido una herramienta útil a para cuantificar de manera más exacta las zonas de la Región de Murcia donde puede ser interesante la instalación de sistemas de aprovechamiento solar. Esto es posible gracias a la conjunción de los resultados de irradiación global, directa, difusa, sobre plano horizontal e inclinado y los datos de temperatura ambiente en un sólo documento.

Se han obtenido 12 mapas de irradiación media diaria mensual, 3 de irradiación directa, difusa y global anual para toda la región y 45 mapas para cada una de los municipios de la Región de Murcia. De un modo análogo al explicado se han obtenido 13 mapas de temperatura ambiente media mensual y anual a nivel superficial en toda la región.

Se ha puesto de manifiesto la utilidad de uso de las técnicas SIG para la realización de mapas de irradiación y la necesidad de realizar mapas localizados en zonas pequeñas, con el máximo histórico de datos y con el máximo detalle para la correcta realización de esta clase de mapas.

Por último decir que este trabajo ha dado lugar a la edición del primer Atlas de Radiación Solar y Temperatura ambiente en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Este Atlas ha sido concebido para que sirva de herramienta útil a todos los ingenieros, proyectistas, diseñadores, promotores, etc. a la hora de calcular y/o construir una instalación de aprovechamiento solar.





## REFERENCIAS

1. CCE. "Atlas européen du rayonnement solaire, Vol. I: Rayonnement global sur des surfaces horizontals". 1ère edition, Grösschen Verlag, Dortmund. (1979)
2. Aguiar, R., Albuissou, M., Beyer, H. G., Borisenkov, E. P., Bourges, B., Czeplak, G., Lund, H., Joukoff, A., Scharmer, K., Page, J. K., Trezenbach, U. and Wald, L.. The European Solar Radiation Atlas. Vol. 1. Fundamentals and maps. Vol. 2 Database and exploitation software. École des Mines de Paris. pp. 118 Vol.(1) and 296 Vol.(2). (2000)
3. Font, I.. Atlas de radiación solar en España. Instituto Nacional de Meteorología. (1984)
4. Generalitat Valenciana. Atlas de Radiación solar a la Comunitat Valenciana. (1987).
5. EVE. Atlas de radiación solar del País Vasco (1992).
6. Baldasano et al. Atlas de radiació solar a Catalunya (1992, 1996 y 2001).
7. Baldasano et al. Atlas de Radiación Solar de las Islas Baleares - Mediante imágenes de Satélite (2003).
8. Martínez-Lozano, J. A.. Irradiación solar global e insolación en Valencia. Revista de Geofísica, Vol.(40),. (1984) páginas 279-290
9. B. Liu, R. Jordan, "The interrelationship and Characteristic Distribution on Direct, Diffuse and Total Solar Radiation", "Solar Energy", (1960)
10. Vera-García et al. Atlas de Radiación Solar y Temperatura ambiente en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. ISBN:978-84-95781-97-0. ARGEM-UPCT. (2007).